

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

廃棄物の高度な地域熱利用のための技術・社会システムに関する研究
(3-1709)

平成29年度～令和元年度

Study on technologies and social systems for efficient utilization of heat recovered from waste

〈研究代表機関〉

国立研究開発法人国立環境研究所

〈研究分担機関〉

東京理科大学

東洋大学

令和2年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発の方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	14
II-1 廃棄物からのエネルギー回収を最大化する技術システムと評価 （国立研究開発法人国立環境研究所）	14
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-2 廃棄物の高度な地域熱利用を推進するための社会インフラ・制度 （東京理科大学）	43
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-3 人口分布と産業分布を踏まえた焼却施設等の最適立地 （東洋大学）	82
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	

- 4. 結果及び考察
- 5. 本研究により得られた成果
- 6. 国際共同研究等の状況
- 7. 研究成果の発表状況
- 8. 引用文献

Ⅲ. 英文Abstract

..... 102

I. 成果の概要

課題名 3-1709 廃棄物の高度な地域熱利用のための技術・社会システムに関する研究
 課題代表者名 藤井 実 (国立研究開発法人国立環境研究所社会環境システム研究センター
 環境社会イノベーション研究室室長)

研究実施期間 平成29～令和元年度

研究経費(累計額) 48,598千円

(平成29年度:16,474千円、平成30年度15,650千円、令和元年度:16,474千円)

本研究のキーワード 焼却、熱利用、産業、エクセルギー、費用対効果、地域熱利用ビジネスモデル、社会実装支援、政策影響シミュレーション

研究体制

- (1) 廃棄物からのエネルギー回収を最大化する技術システムと評価(国立研究開発法人国立環境研究所)
- (2) 廃棄物の高度な地域熱利用を推進するための社会インフラ・制度(東京理科大学)
- (3) 人口分布と産業分布を踏まえた焼却施設等の最適立地(東洋大学)

1. はじめに(研究背景等)

気候変動の緩和に向けて、化石燃料を代替し得る廃棄物を効率的に利用することが一層重要になっている。国内においては、廃棄物からのエネルギー回収の手段としては、大部分で焼却発電が採用されている。しかし、特に一般廃棄物の焼却炉では、燃焼ガスが腐食性に富むなどの理由により、その発電効率は20数%程度に留まる。抜本的な効率向上には、熱利用を行うことが望ましい。しかし、熱は温度帯によってエネルギーの質的価値が大きく異なる。暖房や給湯レベルの温度の熱は、ヒートポンプによって効率的な供給が可能であり、更にヒートポンプの電源を太陽光発電などの再生可能エネルギーに求めることもできるなど、競合技術の進歩も考慮する必要がある。一方、乾燥、反応、蒸留、殺菌、調理など、高温の熱需要(蒸気需要)のある製造工場では、ヒートポンプの適用が困難であり、100℃近辺の蒸気であっても、ヒートポンプの導入がなかなか進んでいない。しかし、焼却炉で製造できる蒸気は300℃～400℃、圧力の面でも工場側の少なくとも中・低圧蒸気の条件を満たすことができるため、有効利用が可能である。焼却発電の効率は火力発電の効率(高効率なものでは60%を超える)に比べて大きな遜色があるが、ボイラー効率では工業用ボイラーとそれほど差がない。焼却熱を従来の発電から、工場への蒸気供給に切り替えることができれば、CO₂排出削減の観点でも、また経済性の観点でも大きく貢献できる可能性が高い。問題は、配管を通して蒸気を供給する必要があることで、焼却施設と工場とがある程度近接(例えば5km程度以内)している必要があるため、実現できる場所は限定される。焼却施設の近隣にまとまった蒸気需要がないケースでは、従来通り発電を最大化しつつ、復水器等における冷却水が温水として回収されるため、近隣にまとまった温熱需要がある場合には、この熱を暖房や給湯に利用することも有効な手段になる可能性がある。このように、廃棄物の焼却熱の利用を高効率化できる余地が大きいため、本研究において必要な技術や社会システムを示し、導入可能な地域やその効果を明らかにする。

2. 研究開発目的

廃棄物のエネルギー利用を高度化するには、熱利用の重要性が指摘されてきたが、300～400℃の蒸気を製造し得る焼却熱を、20数℃の暖房や、40℃の給湯に利用するのは非効率であり、競合するヒートポンプ等の代替技術と比べて、経済面でも劣り熱利用を妨げてきた。エネルギーの質(エクセルギー)的効率の高い、技術・経済の両面で競争力の高い熱利用システムを整備する必要がある。具体的には、
 (1)100～数100度の熱を需要する、産業への熱供給

(2)住宅、公共、商業施設等（以下、民生）への熱供給は、発電を犠牲にしない50～60度の低温熱供給を行うことで、エクセルギー効率を飛躍的に高め、燃料消費削減による収益を拡大し、CO₂排出の大幅削減に寄与できると考えられる。そこで、具体的には各サブテーマで以下の目標を掲げて研究を実施する。

サブテーマ1では、廃棄物の地域熱利用について、既存事例を調査しエネルギー利用を高度化する理論的検討した上で、エクセルギー効率と経済性の両面から有効な技術を示す。また、資源（廃棄物）の効率的な利用を促す低炭素効果の評価方法の改善を行う。地域特性格別の効率的な熱利用システムとして、焼却施設から工場への蒸気供給、発電を犠牲にしない低温の熱供給に、固形燃料化やメタン発酵を併用するケースも含めてシステムをモデル化し、CO₂排出削減効果や費用便益を明らかにし、廃棄物発電に比べてエネルギー回収を飛躍的に向上するシステムを示す。**サブテーマ2**では、低温温熱を供給する第4世代地域熱供給を含めて、国内および海外の事例調査に基づき、阻害要因と緩和策を抽出する。また、自治体向けインターフェースを作成して清掃工場の実態調査を行い、地域特性データベースを構築して、高度な地域熱利用システムの特定地域での費用便益分析を実施し、社会実装を支援する検討を行う。加えて、自治体の政策影響シミュレーションを実施し、廃棄物政策、エネルギー政策、都市政策を統合的に分析する枠組みを提示する。そして、高度な地域熱利用を実現のために必要な社会インフラ・制度を明らかにし、ステークホルダーごとの役割を明示的に論じる。**サブテーマ3**では、既存の広域化計画も踏まえて、焼却施設から製造工場への蒸気供給を核とする地域熱利用について、熱需給のマッチングによる適地の推計が可能なモデルを構築し、愛知県をケーススタディ地域として、広域化の有無別等の将来計画の違いによる、焼却施設から産業への蒸気供給ポテンシャルを推計し、費用対効果のシミュレーションから、対策の社会実装に資する知見を提供する。加えて、地理情報システムによる全国での焼却熱の産業利用の適地推計を行い、焼却施設建設に対する意識調査と住民合意を踏まえた上で、効率的なエネルギー回収を実現するための、焼却施設等の最適立地やそれに資する政策等の提案を行う。

3. 研究開発の方法

本研究課題全体の構成を図3.0.1に示す。サブテーマ1で極めて効率的な廃棄物の熱利用に資する技術システムの設計と評価を実施し、サブテーマ2で提案された技術システムを社会実装するために必要な社会インフラ・制度を検討し、サブテーマ3では、提案された技術システムの地域適合性について検討する。全サブテーマで協力して、研究成果を活用し提案するシステムの社会実装実現を支援する。

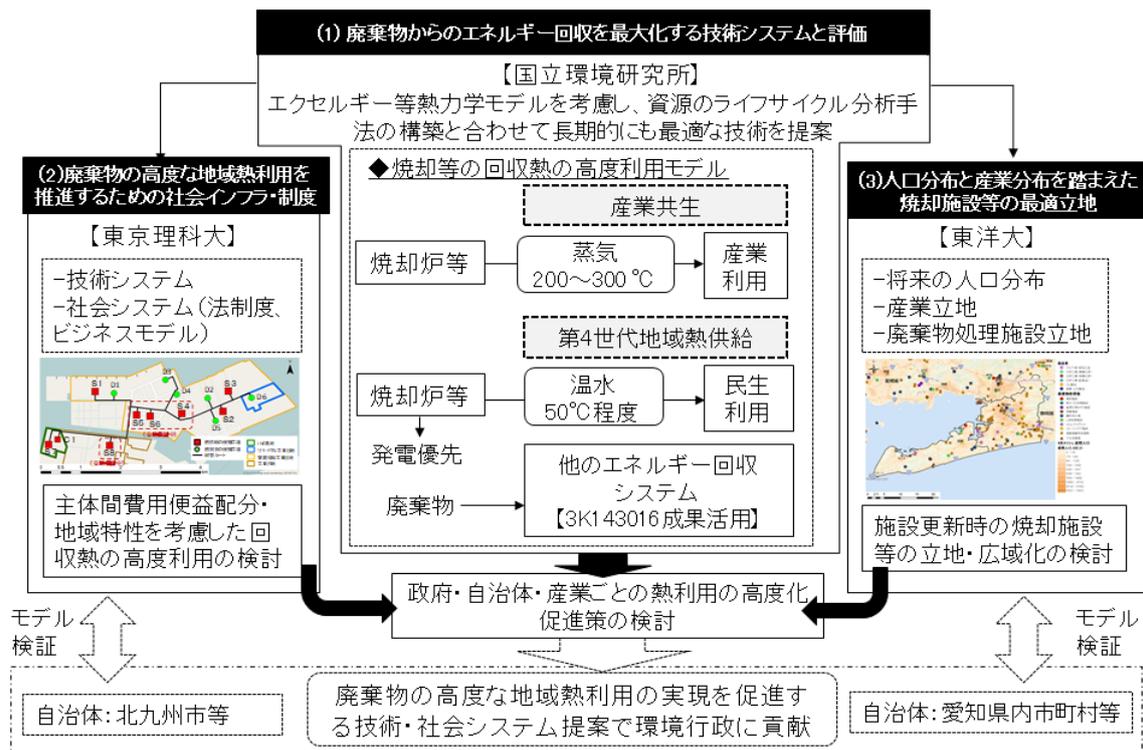


図3.0.1 本研究課題の構成

(1) 廃棄物からのエネルギー回収を最大化する技術システムと評価

エネルギー利用を高度化する理論的検討

国内の焼却施設のエネルギー回収としては、主に発電が進められてきた。しかし、国内の焼却施設では、発電効率は20%に留まる（環境省、2018）。同様に固形燃料を直接燃焼する石炭火力発電所の発電効率が、最大で45%程度に達することを考えると、2倍程度の効率の差が存在する。焼却炉の低い発電効率を補うには、熱利用を行うことが有効である。しかし、暖房や給湯目的の低温の熱供給であれば、ヒートポンプによって効率的に行うことが可能であるため、ヒートポンプの高効率化と普及が進むにつれ、焼却炉からの暖房・給湯目的での熱供給で削減できる化石燃料消費量は、限定的になる。低炭素性能の大幅な改善には、熱利用の効率性の考慮が必要である。高温の熱需要を必要とする製造工場に焼却施設から蒸気を供給することが有効だが、これをエネルギーの質的効率であるエクセルギー効率の観点と、今後低炭素化、脱炭素化が進む中での、将来のエネルギーシステムとの親和性の観点から整理する。

低炭素効果の評価方法の改善

持続可能な低炭素都市の構築にあたって、様々な低炭素な地域資源を活用する必要がある。しかし、製品やサービスの環境性能等を評価する、従来のライフサイクルアセスメント（LCA）の手法では、低炭素資源の投入が、ある製品の低炭素化に役立つことを示すのみで、社会全体としてみた場合には、必ずしも効率的な資源の利用方法ではない場合が存在する。そこで資源のLCAと呼ぶ、各資源がそのライフサイクルにおいて効率的に機能を提供できるかを評価する方法を提案した。

地域特性別の効率的な熱利用システムの検討

地域特性に合ったエクセルギー効率の高い廃棄物の熱利用システムを採用することにより、CO₂排出削減と経済性の両面で競争力の高い熱利用システムとすることが可能となる。図3.1.1及び表3.1.1に示すように、焼却施設の規模別と、周辺の工場の熱需要の有無別に、高効率なエネルギー利用のシステムを提案し、CO₂削減効果及び経済性の評価を行う。焼却施設の近隣に工場が存在する場合は蒸気供給を優先する。また、焼却炉の規模別にケースを設定する。モデルケースとして、高効率発電が可能な600t/日（近年は、100t/日程度以上の施設規模で発電効率20%程度が可能）の処理規模と、これまでエネルギー回収が困難とされてきた小型の焼却施設として、30t/日の処理規模を設定する。大規模のケースでは、工場の蒸気需要が存在する場合はこれを優先するが、焼却施設が供給可能な蒸気量に対して蒸気需要が少ないケースもあり得るため、発電しつつ抽気蒸気を供給する場合（ケース1a）と、需要が十分あり、発電を停止して製造した蒸気を全量工場に送る場合（ケース1b）を設定する。また、大規模であるが蒸気需要がない地域については、従来通りの高効率発電のみを行う場合（ケース2a）をベースラインとして設定し、周辺の住宅・業務系の建物等にまとまった温熱需要が存在する場合を想定して、発電を犠牲にしない低温温熱の供給を行う場合（ケース2b）を設定する。小規模のケースでは、これまでエネルギー回収をしていない場合が多いことから、ボイラーを追加的に設置し、製造した蒸気を近隣の工場に供給することを想定する（ケース3）。小規模であるが、近隣に蒸気を必要とする工場が存在しない場合には、食品廃棄物の選別によるメタン発酵・発電と、プラスチックや紙類等の固形燃料化を行うことを想定する（参考ケース）。CO₂排出削減効果の推計方法については、本報告書の詳細版を参照されたい。



いずれのケースも容器包装や古紙類の分別・リサイクルは従来通り行われる前提

図3.1.1 廃棄物からのエネルギー回収高度化の地域別方策

表3.1.1 廃棄物からのエネルギー回収方策の評価ケース

廃棄物焼却施設の規模	近隣に製造工場あり	近隣に製造工場なし
大都市:ごみ焼却炉600t/日	ケース1a: 低圧蒸気供給: 抽気蒸気供給	ケース2a: 高効率発電: 熱供給なし(ベースライン)
	ケース1b: 高圧蒸気供給: 全量蒸気供給	ケース2b: 高効率発電+低温温水供給(第4世代地域熱供給)
地方都市: 30t/日	ケース3: 高圧蒸気供給: 全量蒸気供給 水噴射式ガス冷却タイプをボイラーに改造	参考ケース: 固形燃料化RPF+メタン発酵

熱供給のための建設費用等の推計

廃棄物処理施設と熱供給により新たに必要となる設備に分けて、おおよその建設費を算出する。廃棄物処理施設の方式・規模と新たに必要となる熱供給設備の内容を表3.1.2に示す。

表3.1.2 廃棄物処理施設の方式・規模と新たに必要となる熱供給設備

ケース	廃棄物処理施設の方式・規模	熱供給設備の内容
ケース1a	600t/日標準タイプ ¹⁾ 焼却施設	低圧蒸気供給設備 ²⁾ 蒸気供給配管
ケース1b	600t/日発電設備なし焼却施設	高圧蒸気供給設備 ²⁾ 蒸気供給配管
ケース2a	600t/日標準タイプ ¹⁾ 焼却施設 (ベースライン)	なし
ケース2b	600t/日水冷コンデンサー式焼却施設	温水供給配管 ³⁾
ケース3	30t/日発電なし、水噴射式ガス冷却タイプ焼却施設をボイラータイプに改造	廃棄物焼却施設のボイラー 高圧蒸気供給設備 ²⁾ 蒸気供給配管
参考 ケース	15t/日RPF製造施設 ⁴⁾ 7t/日メタン発酵施設	なし

(2) 廃棄物の高度な地域熱利用を推進するための社会インフラ・制度

社会インフラ・制度の定義と学術的な研究設計

廃棄物からの高度な熱利用は、国・自治体の定める制度のもとで、ステークホルダーが、ソフトな社会インフラとしての社会実装の支援枠組みを利用し、ハードな社会インフラを整備し、制度に則って運営することで推進することができるとの観点に立ち検討した。そして、産業共生、廃棄物からのエネルギー回収、地域熱供給の分野をレビューし、サブテーマを位置づけ、研究設計した。

事例調査に基づく廃棄物からの高度な地域熱利用の阻害要因とその緩和策の抽出

国内の実態調査として、ステークホルダーへの集中的なインタビュー調査と技術・経済データ、法制度、ビジネスモデルの観点から事例調査を実施した。海外のベストプラクティス調査として、産業での地域熱利用については、韓国のエコ・インダストリアル・パーク事業事例を低温排熱の民生利用では、デンマークの第4世代熱供給システムベストプラクティスとして調査し、国内への示唆を考察した。

一般廃棄物の清掃工場の実態調査と地域特性データベースの構築

「都市廃棄物からの最も費用対効果の高い資源・エネルギー回収に関する研究(3K143016)」で構築した長期シミュレーションツールを発展させ、自治体あるいは一部事務組合向けのインターフェースを設計・開発した。これを活用し、2018年5月24日～7月2日にかけて、772の自治体の担当者に対し、各行政体および1,011の清掃工場に関する調査を実施した。自治体からの有効回答(48.2%)、各清掃工場の有効回答(43.7%)を得た。あわせて、廃棄物からの高度な地域熱利用を検討するにあたり、都道府県での広域化ブロック、市区町村、一部事務組合、メッシュ、清掃工場、製造工場の立地ポイントといった異なる

る空間スケールの情報をGIS上に構築した。

特定地域での費用便益分析と社会実装支援

特定地域における費用便益分析と社会実装支援を検討した。産業での地域熱利用は、北九州市の産業団地を対象に熱需要のある3工場、熱供給できる5工場の熱利用ネットワークを設計し、エクセルギー効率を高めることを意図し、費用・便益を算定した。また、ネットワーク全体の費用便益分析だけでなく、ステークホルダーごとの配分に着目し、分析できる枠組みとし、ビジネスモデル分析を可能にした。さらに、「産業スマートエネルギーシェアリング研究会」の運営に貢献し、具体的な社会実装支援策を検討した。低温排熱の民生利用では、清掃工場からの低温排熱と他の再生可能エネルギーとの比較が可能な地域エネルギーモデルを開発し東京都江東・中央区でシミュレーションを実施した。

政策影響シミュレーション

より広域な政策影響の分析のため自治体のモデルシミュレーションを実施した。補助制度、FITなどの価格メカニズム、温対法の報告を含めた低炭素化へのインセンティブ付与、規制緩和などの公共の制度ならびにビジネスモデルに関する操作変数による影響分析を実施した。具体的には、廃棄物処理の広域化を含めた清掃工場の統廃合のタイミングを分析できるモデルを構築し、長期政策影響シミュレーションを実施した。

(3) 人口分布と産業分布を踏まえた焼却施設等の最適立地

熱需給のマッチングによる適地の推計

愛知県等の既存の広域化計画を調査し熱の供給量、潜在的需要量等について検討を行った。さらに、人口や産業の空間分布を踏まえて、サブテーマ1、2で検討される可能なエネルギー回収の選択肢を考慮した上で、蒸気供給可能な焼却炉・工場の組み合わせを抽出し、熱交換ポテンシャルを推計するために、以下の3点について評価するモデル開発を行った。

- a. 廃棄物の発生地ごとの組成の違い・収集範囲による熱量への影響
- b. 処理施設の規模による熱供給可能量の推定
- c. 産業立地による熱需要量の地理的推定
- d. 施設を導入した場合の費用対効果

地理情報システム (GIS) による全国での焼却熱の産業利用適地推計

地理的な条件を踏まえて地域熱利用導入の可能性のある地域を選定した。GISから工業団地等の熱需要に近接する焼却施設を抽出し、全国の新規焼却施設を立地する候補地を抽出する。国土数値情報(工業団地・工業用地、一般廃棄物焼却処理、産業廃棄物中間処理施設、文化施設・スポーツ施設等)、各県の産業廃棄物協会HP等のデータを利用し、ソフトウェアはQGIS v3.8を利用した。

焼却施設建設に対する意識調査と住民合意の手続き

提案するシステムの社会実装に向けた検討を行った。焼却熱の高度利用を行う上で、工業団地内あるいは近距離にある焼却施設数は限られるため、今後の更新等のタイミングで蒸気需要の大きな地域に再配置することが理想的であるが、それには住民の合意が鍵となる。焼却施設との心理的距離によって、施設建設の意識が変わるかを調査した。ネットアンケート(マクロミル社)2018年2月16-18日に実施し、サンプル数は620件であった。また、高度熱利用施設を備えた廃棄物焼却施設を立地するための地域住民の合意に至る手続きについて整理した。

4. 結果及び考察

(1) 廃棄物からのエネルギー回収を最大化する技術システムと評価

エネルギー利用を高度化する理論的検討

熱力学的観点と、ヒートポンプなど、今後主流化すると考える熱供給や利用の技術の面から考察すると、現在の技術では化石燃料を非効率に利用せざるを得ないプロセスを、廃棄物の持つエネルギーで置き換えることができれば、代替される化石燃料が高いエクセルギー率で利用される間接的な効果を含めて、社会全体としてのエクセルギー効率の向上に貢献することができる。これに当てはまるのが、焼却

施設から熱需要のある製造工場に蒸気を供給する対策であり、CO₂排出削減と経済性の両面で効率的となる。また、将来再生可能エネルギーが主流化すれば、特に太陽光発電の発電量が豊富な日中において、電力よりも蒸気が高価になる可能性もあると思われる。焼却炉においてまず製造されるのは蒸気であるため、将来は蒸気を蒸気のまま供給することの価値が、一層高まると考えられる。産業を脱炭素化する観点でも、今後は図4.1.1に示すように、経済性の高い焼却熱の利用を契機に、産業団地の熱供給インフラを脱炭素化に向けて転換する「産業スマートエネルギーシェアリング」を展開することが望ましい。

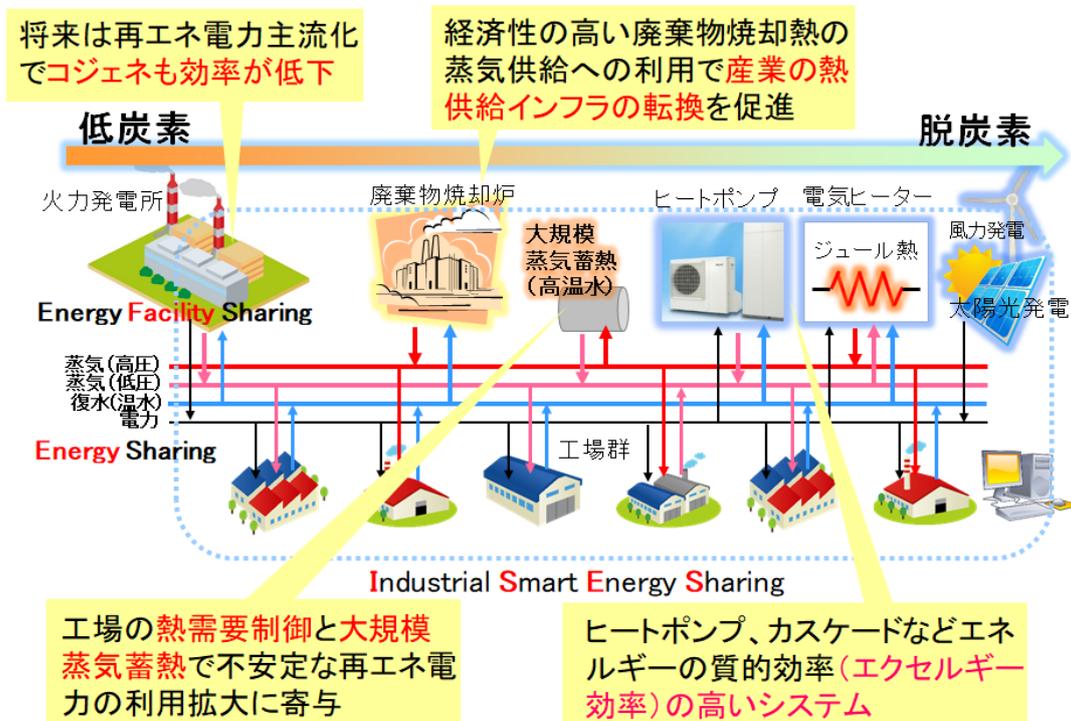


図4.1.1 焼却熱の利用を中核として産業の脱炭素化を推進する産業スマートエネルギーシェアリング

低炭素効果の評価方法の改善

新たな評価方法として提案する資源のLCAは、従来のLCAの枠組みを大きく逸脱するものではなく、ライフサイクルの評価であれば、循環資源によって代替される新規資源の社会における価値を端的に示すプロセスを、システム境界内に加えて評価するものである。従って、従来のLCAのツールやデータベースを使って容易に評価が行える利点がある。これだけの簡易な計算で、廃棄物を含めて資源の社会における適材適所での利用に繋がる評価を行うことができる。

地域特性別の効率的な熱利用システムの評価結果

設定した各ケースにおける、廃棄物1t当たりのCO₂排出削減効果及び投資回収年数を図4.1.2に示す。発電量当たりのCO₂排出量の大きなC重油を代替する方が、CO₂排出削減効果は大きく算定される。大型の焼却施設(600t/日)において発電を停止して高圧蒸気の全量を製造工場に送るケース1bにおいて、特に大きな削減効果が得られ、発電のみを行うケース2a(ベースライン)に比べて2倍程度の削減効果となる。

次に、発電を犠牲にしない低温温水を民生系の建物に送るケース2bでは、ヒートポンプによる熱供給を代替する想定や、低温温水で給湯する場合にはガスボイラーで追い炊きが必要という設定のため、このガス消費が影響するために、CO₂はわずかに増加するとの結果となった。加温を必要としない暖房用途に限定すれば、熱需要量の大きさに応じてある程度のCO₂排出削減効果が得られる可能性はある。

さらに、従来効率的なエネルギー回収が困難であった小規模な焼却施設(30t/日)にボイラーを後付けし、製造する蒸気の全量を製造工場に送る想定の場合3では、廃棄物1トン当たりのCO₂排出削減効果が、大型焼却施設の場合と同様に、高効率発電を行う場合の2倍程度大きくなり、小型焼却施設において製造工場への蒸気供給は極めて効果的な手段になり得ることが分かる。また、近隣に蒸気需要がないケ

ースでは、固形燃料化やメタン発酵を組み合わせることで、高いCO₂排出削減効果が期待できる。製造工場への蒸気供給は経済性も高く、小型焼却炉にボイラーを後付けで設置する場合でも数年で熱供給のための初期投資が回収できる。

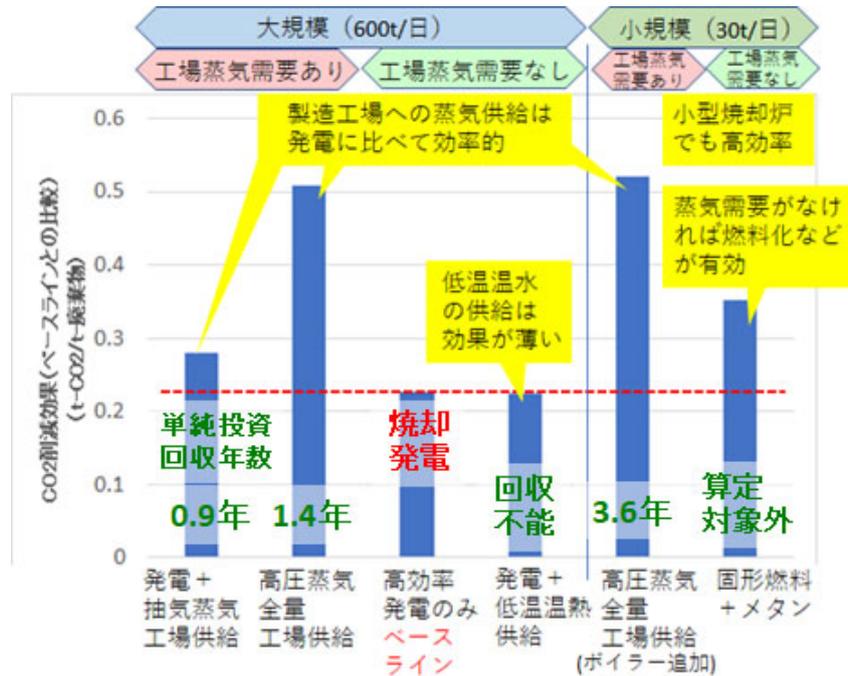


図4.1.2 熱利用の各ケースのCO₂排出削減効果と投資回収年数

また、全サブテーマの検討結果を総合し、サブテーマリーダーが中心となって、提案する熱利用システムの社会実装に向けて表4.1.1のように精力的に活動を行った。

表4.1.1 焼却熱の高度な利用システムの社会実装推進のための活動

カテゴリー	内容
産廃焼却施設から製造工場への蒸気供給の計画支援	<ul style="list-style-type: none"> クレハ環境(株)がいわき市で実施した、FSに技術面で貢献。 産廃事業者と焼却施設周辺の熱需要等具体的な調査を実施。
自治体焼却施設から製造工場への蒸気供給の計画支援	<ul style="list-style-type: none"> 自治体焼却施設から、近隣の大手製造工場への蒸気供給について、双方の担当者を交えて具体的な検討を開始。 工業都市の自治体と協力して工業団地の熱需要を調査し、事業化に向けた検討に着手。
産業スマートエネルギーシェアリング研究会の運営に貢献	<ul style="list-style-type: none"> 北九州産業学術推進機構において研究会を設立。事業化の案件抽出や、事業の面展開に必要なマネジメント機能を検討。
環境行政への貢献	<ul style="list-style-type: none"> 環境省・中小廃棄物処理施設における廃棄物エネルギー回収方策等に係る検討調査検討会に参画。焼却熱の製造工場での利用は、同委員会のガイダンスでも採り上げられた。 環境省・廃棄物処理システムにおける低炭素・省CO₂対策普及促進方策検討調査検討会に委員として参画。同委員会では製造工場の熱需要の調査などが行われた。 環境省・廃棄物焼却施設からの余熱等を利用した地域低炭素化モデル事業に貢献。 環境省主催のシンポジウム及び講演会で焼却熱の製造工場での利用をテーマに基調講演を実施。
学会における研究成果の普及	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄物資源循環学会誌で「廃棄物の熱エネルギー利用の高度化に向けた展望」と題する特集号を発行。
海外展開	<ul style="list-style-type: none"> インドネシア工業省、バンドン工科大学、国立環境研究所の3者で、焼却熱の製造工場での利用に関する研究協力の覚書を締結。日本からは現地で都市開発を行う商社や産廃事業者、現地では複数の自治体などとの協力体制を構築。

- | | |
|--|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> 中国清華大学や上海交通大学、中国の公的研究機関、韓国蔚山大学、香港城市大学などと、焼却熱の産業利用を含む、スマート産業団地に関する共同研究を実施。 |
|--|---|

(2) 廃棄物の高度な地域熱利用を推進するための社会インフラ・制度

学術的な研究の位置づけ

事業化の進捗に着目し、研究目標の達成に向け、候補となる地域の特定、設計と費用便益の概算、技術・経済的フィージビリティ分析、ビジネスモデルの設計による費用・便益・リスクの配分のフェーズにわけ、それぞれ研究開発の方法と対応させた。さらに、個別事業に加えて、他地域への水平展開を意図したScaling upのフェーズも長期政策影響シミュレーションで分析する研究枠組みを提示した。

事例調査に基づく廃棄物からの高度な地域熱利用の阻害要因とその緩和策の抽出

廃棄物焼却熱の産業・民生での高度利用についての事例調査・動向調査の結果、廃棄物の高度な地域利用の推進に向けた施策、阻害要因とその緩和策を抽出できた。具体的には、現状の国内の社会システムと制度は、国、自治体、事業レベルでの階層的で一貫した支援体制が欠けており、個々の事業レベルでの力量に委ねられている点が重大な課題で、阻害要因である。緩和策として、国のエネルギー政策における熱利用のロードマップ策定、廃棄物/循環、エネルギー法制度での熱利用の位置づけ、自治体における地域熱・エネルギー利用計画が制度的な課題となる。そして、社会実装支援策として、清掃工場の収益性・公共性の向上に向けたビジネスモデル作成、実施、知見の集約する機能を有する中間組織の設立が有効な手段だと結論付けた。

一般廃棄物の清掃工場の実態調査と地域特性データベースの構築

本アンケート調査で、清掃工場のエネルギー回収に関する技術・経済データ及び選好、改良・更新スケジュールに関する基礎情報と選好の分析ができた。同時に、GISを用いた自治体の地域特性データベースを構築した。これにより、廃棄物政策、地域エネルギー政策、産業立地政策を時系列での研究する基盤を得た。

特定地域での費用便益分析と社会実装支援

産業団地での熱利用ネットワークの発電量・熱供給量を算出し、系統電力購入量、ガス使用量等を求め、各段階の導入による便益を特定し、事業性評価（光熱費削減費、経費、建設費積算額、単年度投資回収年）を算定した。さらに、図4.2.1に示すように、この費用便益分析を、熱供給事業者、熱需要事業者、熱管理事業者、情報管理事業者の視点から考察した。そのうえで、社会実装に向けて情報発信機能と人材育成機会の創出、法人化の設計、清掃工場に対するアプローチ、知見・経験の蓄積策、人材の確保、情報技術の活用、長期的な収益構造を検討した。

民生系の地域エネルギーモデルによる費用便益分析では、清掃工場の低温排熱は、他の再生可能エネルギーと比較して、費用は高くなるが、システム全体の燃料費削減に貢献することが明らかとなった。このシステムの普及には、40年程度での投資回収するビジネスモデルが不可欠で、こうしたシミュレーションツールの開発、公開や合意形成支援ツールの作成が重要になってくる。

当初、費用便益の評価にとどまる予定であったが、産業利用については社会実装支援まで達成できた。ただし、いずれも規模別の分析には至らなかった。本研究課題では、1地域に着目した分析手法の開発であるため、今後、規模別での差異を検討するなどその汎用性を検証する必要がある。

政策影響シミュレーション

FIT制度がある政策状況下では、清掃工場の基幹改良時に発電設備を規模当たりの最大値とした場合と近隣工場に熱供給した場合で純費用便益は、ほぼ同じである。一方、FIT政策がない状況下では、熱利用の純費用便益は11.4%低い結果となった。国のエネルギー政策が特に再生可能電力に注力することは、一方で高度な熱利用のような事業性の高い政策的な選択肢を不利な状況にしているともいえる。続いて、スケジューリングモデルの第5期分の結果では、広域化計画も含めた清掃工場の更新を時系列で分析できることを確認できた。

以上の研究より、廃棄物の高度な熱利用の推進は、国レベルから自治体、事業レベルまで、一貫した

階層的なエネルギー政策、廃棄物政策の下、産業利用では社会実装支援を担う中間組織の創設、民生利用では長期での投資回収を見据えた公民連携施策を打ち出すことが有効だと結論付けた。

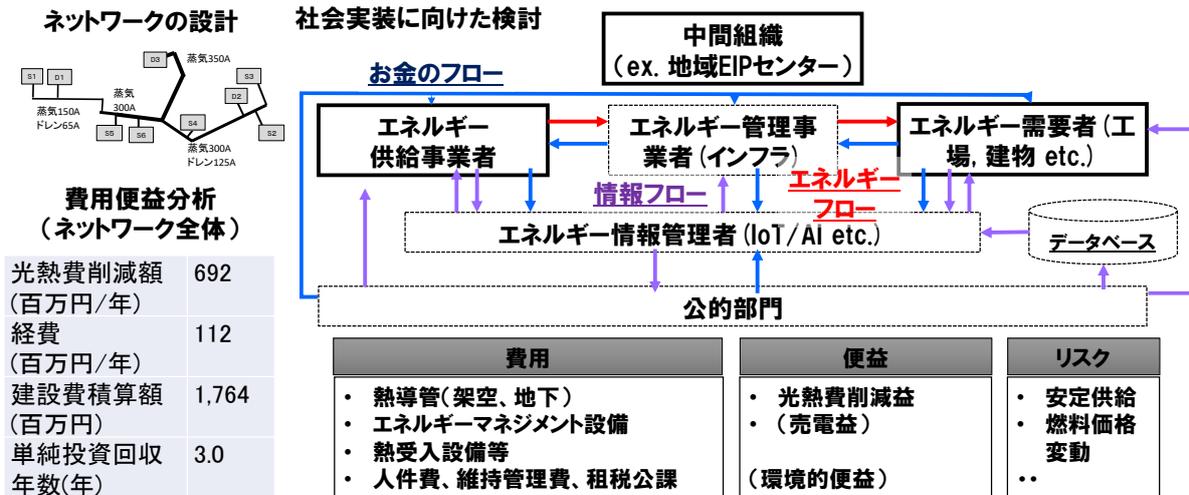


図4.2.1 熱利用事業の費用・便益・リスク配分の検討に向けた枠組み

(3) 人口分布と産業分布を踏まえた焼却施設等の最適立地

熱需給のマッチングによる適地の推計

既存の広域化計画等を踏まえた算定結果の一例として、図4.3.1に供給可能範囲を段階的に広げた場合の、焼却施設から周辺への蒸気供給量を示す。先行事例や理論的な検討から供給可能距離を最大6kmとし、現状の焼却施設の立地および、広域化計画実行時の立地に対して、1km、3km、6kmで蒸気供給量を比較した。どの距離でも施設数の多い現状のほうが熱利用率は大きくなるのがわかる。また、熱需要の大きいメッシュが施設の外縁にあることが多く、メッシュ単体への供給量も6kmのほうが大きい。作成した空間データを活用して、蒸気供給を行う場合の最適立地を求めることができる。

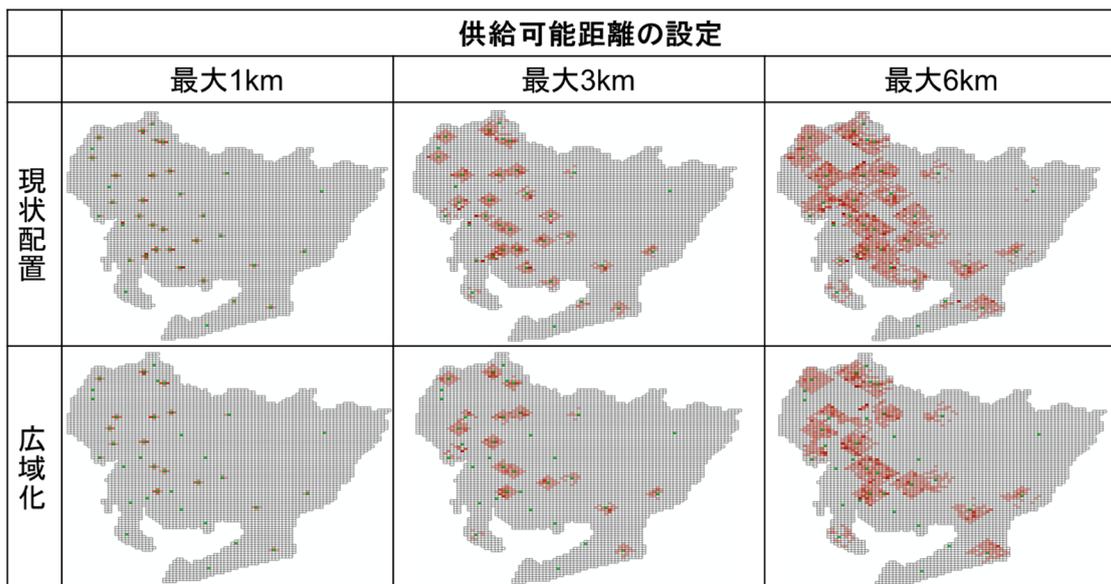


図4.3.1 焼却施設からの輸送距離別の蒸気供給可能量の空間分布 (現状配置と広域化時)

地理情報システム (GIS) による全国での焼却熱の産業利用適地推計結果

地理的な条件を踏まえて地域熱利用導入の可能性のある地域を選定した。一般廃棄物焼却処理施設1257件中、工業団地・工業用地内に立地するものは175件あった。同様に産業廃棄物焼却施設では2983件中

(環境省データより)67件であった。このうち事業候補となるケースが多い県は、千葉 6件、岡山7件、広島10件、福岡12件であり、ともに大きな工業団地を有している県であった。

焼却施設建設に対する意識調査と住民合意の手続き

社会実装に向け住民合意に関する検討を行った。アンケート結果によると、やはり焼却施設が近くに立地することへの抵抗感は大いなもの、自身や地域にメリットがあれば受け入れてもよいとする条件付も含めれば、受け入れても良いと考える割合が半数近くに達しており、適切な政策次第で新規に立地できる可能性も示唆された。住民合意は、高度熱利用施設を備えた廃棄物焼却施設の社会実装に向けて欠かせない手続きである。同施設は単なる廃棄物の処理施設ではなく、処理施設を中心とした「まちづくり」であると言え、処理施設整備計画の段階から近隣住民の正式な委員としての参加を促し、近隣住民が焼却施設を中心にとどのようなまちづくりをしたいか長期間にわたって対話を重ねて立地を決定することがよいと考察された。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

- 大規模な焼却炉に加えて、これまでエネルギー回収の難しかった小規模な焼却炉からも安定して工場に蒸気供給を行い、高い化石燃料消費削減効果を得られる具体的な方法を提示した。その上で地域特性格別の効率的な熱利用システムとして、焼却施設から工場への蒸気供給、発電を犠牲にしない低温の熱供給に、固形燃料化やメタン発酵を併用するケースも含めてシステムをモデル化し、CO₂排出削減効果や費用便益を評価して、従来の焼却発電に比べて2倍程度以上効率的な示しており、当初の目的が達成されるとともに、廃棄物分野のエネルギー技術に新たな知見を与えた。
- 熱利用の対策として従来一般的に検討されてきた廃熱利用は、経済的に成立することが困難なケースが多い。廃熱は、量的には多く発生しているが、エクセルギー（有効エネルギー）量として無駄が多い訳ではない。本研究では、エネルギー利用を高度化する理論的検討を行い、社会全体としてエクセルギーの無駄を減らす熱利用方法を提案しており、結果的に経済的にも非常に効率的な技術の提案となっている。
- 廃棄物を含む資源の適材適所での利用による、社会全体としての最適化を簡易的に評価することのできる低炭素効果の評価方法の改善手法として、「資源のライフサイクルアセスメント」を提案した。成果は国際学術誌に掲載されるなど学術的にも高く評価されており、当初の目的を達成した。
- 国際的なベストプラクティスを調査し、国内での廃棄物からの高度な地域熱利用の阻害要因とその緩和策を抽出した。焼却熱の産業利用と低温排熱の民生利用では、大きく事業の成立要因が異なることから、各々の政策を講じ、ビジネスモデルを研究することの重要性を明らかにした。
- 主たるステークホルダーとなる一般廃棄物の清掃工場について、インターフェースを構築して実態調査を実施するとともに、地域特性データベースを構築し、地域特性格別の政策立案をする基盤を提示した。また、北九州市において熱利用ネットワーク費用便益分析と社会実装支援を実施し、社会実装支援組織としての地域EIPセンターの機能を国内で設立する検討に発展した。
- 愛知県を対象に政策影響シミュレーションを実施し、広域化計画など廃棄物政策とエネルギー政策、都市計画の関連を踏まえた検討をした。
- 焼却施設から製造工場への蒸気供給等について、熱需給のマッチングによる適地の推計が可能なモデルを作成し、需給のマッチングを評価する理論を構築した。モデルにより、愛知県を対象に広域化の有無等のシナリオ別に費用対効果のシミュレーションを実施し、対策の社会実装に資する科学的知見を提供することができた。
- 地理情報システムによる全国での焼却熱の産業利用の適地推計を行うとともに、焼却施設建設に対する住民の意識を明らかにするなど、廃棄物の高度な地域熱利用に資する知見を、廃棄物政策とエネルギー政策、都市計画の関連を踏まえて提示することができた。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

- 環境省・中小廃棄物処理施設における廃棄物エネルギー回収方策等に係る検討調査検討会において、焼却熱の製造工場での利用は、同委員会が作成したガイダンスで採り上げられた。また、環境省が主催するシンポジウムや説明会等において、本研究の成果について基調講演する機会を得て報告した。

<行政が活用することが見込まれる成果>

- 財政の逼迫する地方自治体にとって、焼却施設において回収されるエネルギーの販売収益を増やすことは重要な課題である。提案する焼却熱の製造工場での利用は、売電が固定価格買取制度（FIT）により有利に設定されている条件下においても、発電から蒸気供給に切り替えることで、収入の大幅な増加に繋がり得る。発電が困難な小規模な焼却施設でも、ボイラーを後付けして蒸気供給を行えば、熱供給のための追加投資を数年で回収できる可能性が示されており、自治体に効率的な選択肢を提示することができた。
- 効率的かつ経済的な廃棄物処理施設におけるCO₂排出削減対策として、自治体が本研究を参考にして、焼却施設から製造工場への蒸気供給を計画することが期待される。一部の自治体と既に実施しているが、要望があれば具体的に計画作成等に対して支援することを想定している。
- 廃棄物分野におけるCO₂排出削減対策は、環境行政にとって重要な課題である。これに関わる環境省による複数の委員会に委員として参画するとともに、焼却熱の製造工場での利用については、委員会の中での重要なテーマとしても取り上げられるなど、本研究課題の成果が貢献を果たしている。
- 国が廃棄物焼却施設の建設や改良に対する補助金等の支出を決定する際、効率的な蒸気利用も含めて評価基準とする際の適切な指標化を行う上で、その判断根拠を提供することが期待される。
- 焼却熱の産業利用は、採算性が高いためビジネスモデルの構築支援による推進する可能性がある。成果の一つである韓国の地域EIPセンターの調査と国内での設立に向けた検討は、廃棄物からの高度な熱利用に向けた政策づくりに役立つ可能性がある。
- 一般廃棄物の清掃工場の熱利用に関する選好調査の結果は、基礎データとして政策の検討に貢献できる可能性がある。また、焼却施設と産業熱需要の空間分布とを比較することで、更に効果的に事業候補地を絞り込むための基礎情報を本課題で提供することができた。
- 焼却施設と製造工場の立地の近接性が重要であるが、工業団地内での焼却施設の建設が認められていないケースも多い、この障壁を取り払うため、工業団地造成事業における環境アセスメントにおいて、工業団地内において温室効果ガス及び廃棄物の発生量を削減することを奨励する通知を出すことなど、有効な対策を示した。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) Y. Dou, M. Fujii, T. Fujita, K. Gomi, S. Maki, H. Tanikawa: Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research), vol73(6), p. II_353-II_363 (2017) Potential of Waste Heat Exchange Considering Industrial Location Changes: A Case of Shinchi-Soma Region in Fukushima, Japan
- 2) Y. Dou, S. Ohnishi, M. Fujii, T. Togawa, T. Fujita, H. Tanikawa, L. Dong: Journal of Cleaner Production 170, 548-558. (2018) Feasibility of developing heat exchange network between incineration facilities and industries in cities: Case of Tokyo Metropolitan Area
- 3) Y. Dou, K. Okuoka, M. Fujii, H. Tanikawa, T. Fujita, T. Togawa, L. Dong: Frontiers in Energy, 12 (3), 411-425 (2018) Proliferation of district heating using local energy resources through strategic building-stock management: A case study in Fukushima, Japan.
- 4) L. Sun, Z. Li, M. Fujii, Y. Hijioka, T. Fujita: Frontiers in Energy, 12 (3), 400-410 (2018) Carbon footprint assessment for the waste management sector: A comparative analysis

of China and Japan.

- 5) L. Sun, M. Fujii, T. Tasaki, H. Dong, S. Ohnishi: Resources, Conservation and Recycling, 139, 289-296 (2018) Improving waste to energy rate by promoting an integrated municipal solid-waste management system.
- 6) M. Fujii, Y. Dou, L. Sun, S. Ohnishi, S. Maki, H. Dong, L. Dong and R. Chandran: Resources, Conservation & Recycling, 149, 586-594 (2019) Contribution to a low-carbon society from improving exergy of waste-to-energy system by upgrading utilization of waste
- 7) 牧誠也, 大西悟, 藤井実, 後藤尚弘, 五味馨: 廃棄物資源循環学会論文誌, 30, 153-165 (2019) 地域特性を考慮した収集運搬による費用・CO2 排出量推計のための修正グリッドシティモデルの開発-愛知県を対象としたケーススタディ-
- 8) L. Sun, M. Fujii, Z. Li, H. Dong, Y. Geng, Z. Liu, T. Fujita, X. Yu, and Y. Zhang: Technological Forecasting & Social Change, 151, (2019) Energy-saving and carbon emission reduction effect of urban-industrial symbiosis implementation with feasibility analysis in the city

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

(2) 主な口頭発表 (学会等)

- 1) R. Inaba, T. Tasaki, M. Fujii, N. Yamaguchi: The 9th biennial conference of the International Society for Industrial Ecology (ISIE), Chicago (2017) Estimation of environmental and economic effects of integrating municipal solid waste incinerators in a Japanese region
- 2) S. Ohnishi, M. Fujii, Y. Dou: The 9th biennial conference of the International Society for Industrial Ecology (ISIE), Chicago (2017) Energy recovery system from municipal solid waste as symbiotic network hubs
- 3) M. Fujii, S. Ohnishi, R. Inaba, Y. Dou, L. Sun, S. Maki: The 9th biennial conference of the International Society for Industrial Ecology (ISIE), Chicago (2017) Innovation for realizing a sustainable low carbon and high exergy efficiency society
- 4) 後藤尚弘: 環境科学会 2017 年会、福岡 (2017) 地域資源循環のモデル化に関する理論的・実践的研究
- 5) N. Goto: International Symposium of the 11th SSMS and the 5th RCND 2017, Bangkok (2017) IMPACT OF AREA SCALE ON MUNICIPAL SOLID WASTE TREATMENT
- 6) 藤井実: 北九州産業学術推進機構・エネルギーマネジメント研究会、福岡 (2017) 響灘地区の低炭素型産業都市づくりに向けた取組み
- 7) 稲葉陸太、田崎智宏、河井紘輔、西村 想、山口直久: 第 13 回日本 LCA 学会研究発表会、東京 (2018) 生ごみと下水汚泥の集約処理による環境面および経済面での効果
- 8) M. Fujii, S. Ohnishi, K. Inaba, L. Sun, Y. Dou, S. Maki, The International Society for Industrial Ecology 6th Asia-Pacific Conference, (2018) Toward de-carbonized industry through efficient use of waste and renewable energy.
- 9) 32) S. Mori, A. Kishimoto, S. Ohnishi, 3RD AIEE ENERGY SYMPOSIUM, Current and Future Challenges to Energy Security (2018) An Assessment of Urban Energy Systems Focusing on the Cooling Energy Demand in Hot Summer Days by an Energy Network Model with 151 Subregions of Tokyo Koto Area.
- 10) 後藤 尚弘、日本環境共生学会学術大会(2018) エネルギー回収機能付き廃棄物焼却施設の立地に対する住民意識に関する研究

- 11) N. Goto, S. Ohnishi, M. Fujii, The 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management 2019) Study of location of Solid Waste Incineration Plant with New Energy Recover Facilities in Japan.
- 12) M. Fujii, S. Ohnishi, Y. Dou, L. Sun, and L. Dong, the 10th International Conference of the International Society for Industrial Ecology (2019), Industrial Smart Energy Sharing for promoting de-carbonized industrial park.
- 13) M. Fujii, T. Okadera, N. Goto, S. Ohnishi, S. Maki, L. Sun, The 14th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (2019) Possibility to Building Smart Energy Sharing Network in an Industrial Park Through the Information Sharing.
- 14) 稲葉陸太、田崎智宏、河井紘輔、不破敦、高木重定、第30回廃棄物資源循環学会研究発表会(2019)一般廃棄物フロー全国モデルを用いた市町村別対策効果の推計
- 15) N. Goto, S. Ohnishi, and M. Fujii, the 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management (2019) Study on Location of Solid Waste Incineration Plant with New Energy Recover Facility in Japan
- 16) 大西悟、「第4世代地域熱供給フォーラム」(4DHフォーラム)第4回研究会(2019) 焼却熱利用を機とした地域熱供給の推進～制度設計と公共デザインとの連携の側面から～

7. 研究者略歴

研究代表者

藤井 実

東京大学大学院工学系研究科博士課程、工学博士、現在、国立研究開発法人国立環境研研究所社会環境システム研究センター環境社会イノベーション研究室長

研究分担者

1) 花岡 達也

東京大学大学院工学系研究科博士課程、工学博士、現在、国立研究開発法人国立環境研研究所社会環境システム研究センター統合環境経済研究室主任研究員

2) 稲葉 陸太

東京大学大学院工学系研究科博士課程、工学博士、現在、国立研究開発法人国立環境研研究所資源循環・廃棄物研究センター循環型社会システム研究室主任研究員

3) 大西 悟

東洋大学大学院工学系研究科博士課程、工学博士、現在、東京理科大学理工学部助教

4) 鈴木 正昭

東京大学大学院工学系研究科卒業、工学博士、現在、東京理科大学理工学部講師

5) 伊藤 真理

南山大学大学院数理情報研究科卒業、数理情報学博士、現在、東京理科大学理工学部講師

6) 後藤 尚弘

東京大学大学院工学系研究科卒業、工学博士、現在、東洋大学情報連携学部教授

II. 成果の詳細

II-1 廃棄物からのエネルギー回収を最大化する技術システムと評価に関する研究

国立研究開発法人国立環境研究所

社会環境システム研究センター環境社会イノベーション研究室	藤井 実
社会環境システム研究センター統合環境経済研究室	花岡 達也
資源循環・廃棄物研究センター循環型社会システム研究室	稲葉 陸太
〈研究協力者〉	
社会環境システム研究センター環境社会イノベーション研究室	牧 誠也・SUN LU

平成29年度～令和元年度研究経費（累計額）：32,636千円（研究経費は間接経費を含む）

（平成29年度：11,063千円、平成30年度：10,510千円、令和元年度：11,063千円）

※研究経費は令和元年度までの額。

※研究経費は、千円単位で記載。

[要旨]

パリ協定が締結され、廃棄物からのエネルギー回収の拡大による低炭素化が急務であるが、主力である廃棄物発電の発電効率は20%をやや超える程度に留まる。廃棄物分野で、エネルギーの質的効率（エクセルギー効率）の高い、技術・経済の両面で競争力の高い熱利用システムを、規模別に提案し評価することを目的とする。焼却炉の小規模から大規模のスケール別及び、焼却炉近隣の産業熱需要の有無別に、高度な熱利用のシステムを設定し、その化石燃料消費削減効果とそれに伴う二酸化炭素排出削減効果及び、施設の追加的な建設費と運転に伴う正味の利益の増加から、投資回収年数を算定し、熱利用高度化の有効性を示した。とりわけ、従来から発電を行っている大規模な焼却施設において、発電を停止して蒸気の全量を近隣の製造工場に供給できるケースや、これまでエネルギー回収が困難であった小規模な焼却施設にボイラーを後付けして、同様に製造工場に蒸気を供給するケースにおいて、焼却発電を行う場合と比較して2倍程度大きなCO₂排出削減効果が得られるとともに、多くの化石燃料消費を削減できることから、数年の短い期間で熱供給のための初期投資を回収できることなどが明らかとなった。焼却熱の工場での利用については、成果の社会実装に向けて、複数の自治体や廃棄物処理事業者、熱需要家の企業等との会合を持ち、一部においては具体的な実現可能性調査の着手へと進展した。また、環境省の複数の委員会において、その有効性についてガイダンス等に掲載されるとともに、環境省の主催する講演会や説明会等で、研究成果について発表する機会を得るなど、行政とも連携して研究を推進することができた。

[キーワード]

焼却、熱利用、産業、エクセルギー、費用対効果

1. はじめに

気候変動の緩和に向けて、化石燃料を代替し得る廃棄物を効率的に利用することが一層重要になっている。国内においては、廃棄物からのエネルギー回収の手段としては、大部分で焼却発電が採用されている。しかし、特に一般廃棄物の焼却炉においては、燃焼ガスが腐食性に富むなどの理由により、その発電効率は20数%程度に留まっている。抜本的な効率向上には、熱利用を行うことが望ましい。しかし、熱は温度帯によってエネルギーの質的価値が大きく異なる。暖房や給湯レベルの温度の熱は、ヒートポンプによって効率的に供給することが可能であり、更にヒートポンプの電源を太陽光発電などの再生可能エネルギーに求めることもできるなど、競合技術の進歩も考慮する必要がある。一方、乾燥、反応、蒸留、殺菌、調理など、高温の熱需要（蒸気需要）のある製造工場では、ヒートポンプの適用が困難で

あり、100℃近辺の蒸気であっても、ヒートポンプの導入がなかなか進んでいない。しかし、焼却炉で製造できる蒸気は300℃～400℃、圧力の面でも工場側の少なくとも中・低圧蒸気の条件を満たすことができるため、有効利用が可能である。焼却発電の効率は火力発電の効率（高効率なものでは60%を超える）に比べて大きな遜色があるが、ボイラー効率では工業用ボイラーとそれほど差がない。焼却熱を従来の発電から、工場への蒸気供給に切り替えることができれば、CO₂排出削減の観点でも、また経済性の観点でも大きく貢献できる可能性が高い。問題は、配管を通して蒸気を供給する必要があることで、焼却施設と工場とがある程度近接（例えば5km程度以内）している必要があるため、実現できる場所は限定される。焼却施設の近隣にまとまった蒸気需要がないケースでは、従来通り発電を最大化しつつ、復水器等における冷却水が温水として回収されるため、近隣にまとまった温熱需要がある場合には、この熱を暖房や給湯に利用することも有効な手段になる可能性がある。このように、廃棄物の焼却熱の利用を高効率化できる余地が大きいと、本研究において必要な技術や社会システムを示し、導入可能な地域やその効果を明らかにする。

2. 研究開発目的

パリ協定が締結され、廃棄物からのエネルギー回収の拡大による低炭素化が急務である。廃棄物発電を高効率化する技術対策や、施設の大規模化が図られてきたが、発電効率は20%を超える程度に留まる。また、人口減少する地方部では、中小規模の自治体でも経済的に廃棄物処理し、高効率でエネルギー回収する仕組みが必要である。解決には熱利用の重要性が指摘されてきたが、300～400℃の蒸気を製造し得る焼却熱を、20数℃の暖房や、40℃の給湯に利用するのは非効率であり、競合するヒートポンプ等の代替技術が普及する中で経済面でも劣勢となり、熱利用を妨げてきた。エネルギーの質（エクセルギー）的効率の高い、技術・経済の両面で競争力の高い熱利用システムを整備する必要がある。具体的には、

(ア)100～数100度の熱を需要する、産業への熱供給を優先的に行う

(イ)住宅、公共、商業施設等（以下、民生）への熱供給は、発電を犠牲にしない50～60度の低温熱供給を行う

ことで、エクセルギー効率を飛躍的に高め、燃料消費削減による収益を拡大し、CO₂排出の大幅削減に寄与することができると思われる。そこで、サブテーマ1では、廃棄物の地域熱利用について、既存事例を調査しエネルギー利用を高度化する理論的検討した上で、エクセルギー効率と経済性の両面から有効な技術を示す。また、資源（廃棄物）の効率的な利用を促す低炭素効果の評価方法の改善を行う。地域特性別の効率的な熱利用システムとして、焼却施設から工場への蒸気供給、発電を犠牲にしない低温の熱供給に、固形燃料化やメタン発酵を併用するケースも含めてシステムをモデル化し、CO₂排出削減効果や費用便益を明らかにし、廃棄物発電に比べてエネルギー回収を飛躍的に向上するシステムを示すことを目的とする。

3. 研究開発方法

3.1 エネルギー利用を高度化する理論的検討

3.1.1 焼却熱の産業利用の効率性に関する考察

国内の焼却施設のエネルギー回収としては、主に発電が進められてきた。しかし、火力発電所に比べると相対的にプラントの規模が小さいことや、廃棄物の発熱量の低さや不安定さ、燃焼ガスが腐食性に富むために、ボイラーで製造する蒸気の温度・圧力を一定以下にせざるを得ないことなどの制約により、発電効率はそれほど高くない。廃棄物組成が日本とは異なる欧州では、発電効率が30%程度に達する例もあるが、一般廃棄物を直接燃焼する国内の焼却施設では、発電効率は20数%に留まる¹⁾。同様に固形燃料を直接燃焼する石炭火力発電所の発電効率が、最大で45%程度に達することを考えると、2倍程度の効率の差が存在する。焼却炉の低い発電効率を補うには、熱利用を行うことが有効である。しかし、これまで熱利用の実施は限定的であり、行われていたとしても、焼却炉周辺の建物や温室等の暖房、温浴施設

やプールへの温水供給など、最終的な需要温度が50℃未満の低温の熱供給が主であった。しかし後述するように、このような低温の熱供給は、ヒートポンプによって効率的に行うことが可能であるため、ヒートポンプの高効率化と普及が進むにつれ、焼却炉からの暖房・給湯目的での熱供給で削減できる化石燃料消費量は、限定的になりつつある。低炭素性能の大幅な改善には、熱利用の効率性についても考慮する必要がある。高温の熱需要を必要とする製造工場に焼却施設から蒸気することが有効な解決策となるが、この点について、エネルギーの質的効率であるエクセルギー効率の観点と、今後低炭素化、脱炭素化が進む中での、将来のエネルギーシステムとの親和性及び経済的価値の観点から整理する。

3.1.2 低炭素効果の評価方法の改善

持続可能な低炭素都市の構築にあたって、様々な低炭素な地域資源を活用する必要がある。しかし、バイオマスや循環資源は供給量が限られており、太陽光・風力発電も利用可能な土地の制約でやはり供給量が限定される可能性がある。製品やサービスの環境性能等を評価する従来のライフサイクルアセスメント（LCA）の手法では、低炭素な資源の有限性が考慮されないケースが多く、低炭素資源の投入がある製品の低炭素化に役立つことを示すのみで、社会全体としてみた場合には、必ずしも効率的な資源の利用方法ではない場合が存在する。そこで資源のLCAと名付けた、各資源がそのライフサイクルにおいて効率的に機能（LCAの用語で、エネルギーや素材など、有用な能力）を提供できるかを評価する方法を提案した。

3.2 地域特性別の効率的な熱利用システムの検討

3.2.1 地域特性別のケース設定

地域特性に合ったエクセルギー効率の高い廃棄物の熱利用システムを採用することにより、CO₂排出削減と経済性の両面で競争力の高い熱利用システムとすることが可能となる。図3.1.1及び表3.1.1に示すように、焼却施設の規模別と、周辺の工場の熱需要の有無別に、高効率なエネルギー利用のシステムを提案（図3.1.2、図3.1.3）し、CO₂削減効果及び経済性の評価を行う。結果と考察の欄においても示すように、焼却施設から製造工場への蒸気供給が、CO₂削減効果と経済性の両面から効率的であるため、焼却施設の近隣に蒸気需要のある工場が存在する場合はこれを優先する。一方、高効率な焼却発電の可否は焼却施設の規模に依存するため、焼却炉の規模別にもケースを設定する。ここではモデルケースとして、高効率発電が可能な600t/日（近年は、100t/日程度以上の施設規模で発電効率20%程度が可能）の処理規模と、これまでエネルギー回収が困難とされてきた小型の焼却施設として、30t/日の処理規模を設定する。大規模のケースでは、工場の蒸気需要が存在する場合はこれを優先するが、焼却施設が供給可能な蒸気量に対して蒸気需要が少ないケースもあり得るため、発電しつつ抽気蒸気を供給する場合（ケース1a）と、需要が十分あり、発電を停止して製造した蒸気を全量工場に送る場合（ケース1b）を設定する。また、大規模であるが蒸気需要がない地域については、従来通りの高効率発電のみを行う場合（ケース2a）をベースラインとして設定し、周辺の住宅・業務系の建物等にまとまった温熱需要が存在する場合を想定して、発電を犠牲にしない低温温熱の供給を行う場合（ケース2b）を設定する。温熱需要は季節性があるため、冷熱も供給できることが望ましいものの、冷熱は、発電（効率：20%）とヒートポンプ（成績係数：6）の組み合わせで効率的に（ $20 \times 6 = 120\%$ ）熱供給可能であるため、発電を犠牲にした蒸気供給（コージェネ）と吸収式冷凍機の組み合わせによる冷熱供給では、効率改善には繋がりにくい。そのため、冷熱の供給は想定外とした。現在、データセンターの廃熱等の利用を前提とした、60℃程度の温水を利用する吸収式冷凍機が開発されつつあり、これが普及段階になれば、冷熱の供給も選択肢になると考えられる。小規模のケースでは、これまでエネルギー回収をしていない場合が多いことから、ボイラーを追加的に設置し、製造した蒸気を近隣の工場に供給することを想定する（ケース3）。小規模であるが、近隣に蒸気を必要とする工場が存在しない場合には、焼却施設において極めて効率的なエネルギー回収を行うことは困難であると考えられるため、混合焼却ではなく、食品廃棄物の選別によるメタン発酵・発電と、プラスチックや紙類等の固形燃料化を行うことを想定する（参考ケース）。ただし、参考ケースにおいてはメタン発酵及び固形燃料のいずれにも不適な廃棄物や、メタン発酵の残渣を焼却する

必要があり、このための費用負担が状況により大きく異なることが想定されるため、CO₂排出削減効果のみを評価し、経済面での評価は行わないものとする。



#いずれのケースも容器包装や古紙類の分別・リサイクルは従来通り行われる前提

図3.1.1 廃棄物からのエネルギー回収高度化の地域別方策

表3.1.1 廃棄物からのエネルギー回収方策の評価ケース

廃棄物焼却施設の規模	近隣に製造工場あり	近隣に製造工場なし
大都市:ごみ焼却炉600t/日	ケース1a: 低圧蒸気供給: 抽気蒸気供給	ケース2a: 高効率発電: 熱供給なし(ベースライン)
	ケース1b: 高圧蒸気供給: 全量蒸気供給	ケース2b: 高効率発電+低温温水供給(第4世代地域熱供給)
地方都市:30t/日	ケース3: 高圧蒸気供給: 全量蒸気供給 水噴射式ガス冷却タイプをボイラータイプに改造	参考ケース: 固形燃料化RPF+メタン発酵

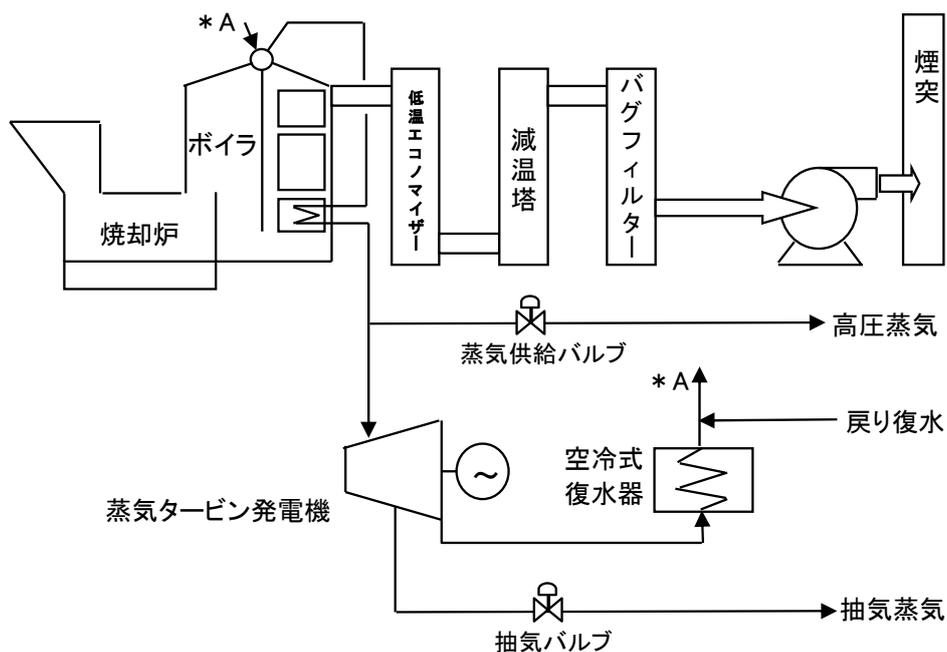


図3.1.2 高圧蒸気または抽気蒸気を製造工場で利用する場合のシステム図 (ケース1a, 1b, 3)

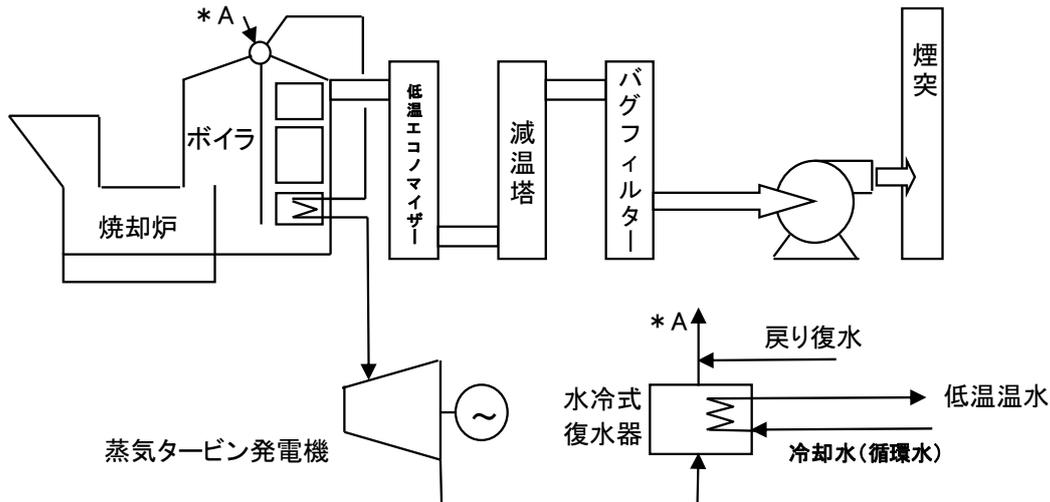


図3.1.3 発電を維持しながら低温の温水を地域に供給する場合のシステム図（ケース2b）

3.2.2 地域特性格のケーススタディの手順

ケーススタディの手順を以下に示す。

- 廃棄物焼却施設から熱利用施設に熱供給するシステムのモデルを設定する。
- 廃棄物焼却施設の規模や熱供給条件（圧力、温度）などの計算条件を設定する。
- 熱バランスを試算し、熱供給量と犠牲にした電力量、化石燃料の削減量を求める。
- 運転経費の削減費（削減できる化石燃料費）と増加分（消費電力または犠牲にした電力費）を試算し、年間運転管理費を試算する。
- 燃料消費削減量などによりエネルギー効率を評価し、CO₂排出削減量より環境負荷低減を評価する。
- 熱供給量から、バックアップ設備等の機器容量を決定する。
- 廃棄物焼却施設からの熱の安定供給の方策を検討する。
- 導管の管径を求め、導管敷設費を試算し、熱供給のために新たに必要となる設備費を算出する。
- 設備費を基に維持管理費、人件費、管理費を加算して年間収支を求め、設備費を年間収支で除して、単純投資回収年を求める。

3.2.3 CO₂排出削減効果の推定に関わる計算条件の設定

(1) 廃棄物の低位発熱量

国内の一般廃棄物の平均的な低位発熱量として、稼動中の全施設（937施設）の全国平均値（8,101kJ/kg1）とする。（出典のデータは計算値を採用し、計算値がない場合は実測値を使用した）

出典：「一般廃棄物処理事業実態調査（平成29年度）」環境省、2019.3

(2) 熱供給条件

ケースごとの熱供給条件を表3.1.2に示す。

表3.1.2 ケースごとの熱供給条件

ケース	廃棄物焼却施設からの熱供給の形態	熱供給条件	戻り水温度
ケース2b	低温温水	50℃	40℃
ケース1a	低圧蒸気(抽気蒸気)	0.8MPa*170℃	80℃
ケース1b, 3	高圧蒸気	3.0MPa*300℃	80℃

注1) 熱供給導管での熱損失は10%と仮定

ただし、低温温水のケース2bは50℃の低温温水の供給であるため、導管の放散熱量は中温温水(60～80℃)で設計された導管(放散熱量は供給熱量の10%)の場合より少なくなる。下記の条件で放散熱量を試算し、放散熱量の比率から7.23%とする。

◆放散熱量の試算条件：既存導管(80℃中温温水)の供給熱量の放散熱量=10%、供給熱量28,400MJ/h、温水導管5,000m直管

・80℃中温温水を送水した場合の放散熱量：321MJ/h

・50℃低温温水を送水した場合の放散熱量：232MJ/h

50℃低温温水の供給熱量に対する放散熱量 = $(232/321) * 10\% = 7.23\%$

出典：「平成29年度廃棄物の地域熱利用に係る装置類の設計・評価と関連情報収集業務」2018.2

注2) 温水の需要量は、東京都港清掃工場から周辺地区に熱供給を計画しているデータをもとに、年平均温水供給量とした。

なお、蒸気需要のある製造工場は表3.1.3に示すような業種である。

表3.1.3 製造構造の業種別の熱供給条件

項目 業種	製造業側で 必要な温度	廃棄物処理施設からの熱供給形態	
		高圧蒸気	低圧蒸気
1 食料品(食材加工)	～150℃	—	0.8MPa*170℃
2 食料品(調理品(中食))	～170℃	—	0.8MPa*220℃
3 食料品(調味料)	～200℃	3.0MPa*300℃	—
4 食料品(パン・菓子)	～200℃	3.0MPa*300℃	—
5 飲料・たばこ・飼料(清涼飲料)	～180℃	—	0.8MPa*220℃
6 飲料・たばこ・飼料(酒類)	～120℃	—	0.8MPa*170℃
7 繊維工業	～170℃	—	0.8MPa*220℃
8 パルプ・紙・紙加工品	～200℃	3.0MPa*300℃	—
9 無機化学	～150℃	—	0.8MPa*170℃
10 有機化学	～180℃	—	0.8MPa*220℃
11 医薬品	～140℃	—	0.8MPa*170℃
12 石油製品・石炭製品	～200℃	3.0MPa*300℃	—
13 プラスチック製品	～200℃	3.0MPa*300℃	—
14 ゴム製品	～230℃	3.0MPa*300℃	—
15 窯業・土石製品	～150℃	—	0.8MPa*170℃
16 鉄鋼業	～200℃	3.0MPa*300℃	—
17 非鉄金属製品	～150℃	—	0.8MPa*170℃
18 一般機械器具	～150℃	—	0.8MPa*170℃
19 電子部品・デバイス・電子回路	～150℃	—	0.8MPa*170℃
20 輸送用機械器具(自動車)	～150℃	—	0.8MPa*170℃

参考) 「産業施設におけるエネルギー消費の実態総調査2017」富士経済、2017.10.27

(3) 年間稼働日数

廃棄物焼却施設の年間稼働日数は「ごみ処理施設整備の計画・設計要領」(全国都市清掃会議、2006.6)で標準的な稼働日数とされる280日を熱供給日数とする。

(4) 発電なしボイラーの試算条件

ボイラー熱回収率：85%

(5) 廃棄物発電の試算条件

- ・投入熱量による発電効率の実機補正係数 $=0.156 * \ln(x) - 0.368$

ここで、 x = 投入熱量 (ごみ処理量 * ごみの低位発熱量) (GJ/日)

- ・蒸気タービン入口蒸気条件：4.0MPa*400℃
- ・発電機効率：0.97 (機械効率を含む)
- ・蒸気タービン背圧：水冷コンデンサー0.02MPa (湿り度10%)
空冷コンデンサー0.03MPa (湿り度10%)

注) 水冷コンデンサーの採用に当たっては熱利用の少ない季節を考慮して、設備的には全量、海水や河川水で復水にできるようにする必要がある。この冷却水を確保するため、海や水量の多い河川に隣接していることも立地条件の1つになる。

- ・蒸気タービン抽気の外部供給量 (ケース1a) : 通常運転時は蒸気タービン入口蒸気量の1/31)
- ・高圧蒸気の外部供給量 (ケース1b、ケース3) : ボイラー発生蒸気全量を供給

注) 蒸気タービンの中段から抽気する蒸気量が多くなると、後段に流れる蒸気量が少なくなり、蒸気の湿り度が高くなる。このような状態ではドレンが多く発生するようになり、長期的にはタービンブレードがドレンアタックにより損傷する。この状況を避けるために、蒸気タービンメーカーでは抽気量の上限值の目安を設定している。

(6) 既存熱供給設備の設定

- ・高圧蒸気、低圧蒸気供給：蒸気ボイラー ボイラー効率90%
 - ・低温温水供給：競合 (代替) する技術としてヒートポンプ温水器を想定 COP4.0
- * 空気熱源の自然冷媒ヒートポンプ温水器で50℃まで加温した年平均値として設定。

出典) オール電化：<http://ecolife.jp.fc2web.com/reform/cop-2.html>

・50℃の低温温水供給の場合、給湯用としてガス焚き温水器で60℃まで昇温する。温水器の熱効率は90%とする。低温温水供給量のうち給湯量の割合は東京都港清掃工場から周辺地区に実際に熱供給を計画しているデータをもとに、年間合計値の割合 (70.0%) で試算する。

(7) 固形燃料 (RPF) の性状及び製造条件

RPF はRefuse derived paper and plastics densified fuelの略称で、廃プラスチック類と紙ごみ (古紙) から製造される固形燃料である。発生履歴が明らかな産廃や分別収集された一般廃棄物で、廃プラスチック類と紙ごみ (古紙) を原料とし、配合比を調整することにより発熱量を調整し、品質を確保している。

- ・低位発熱量：25.7MJ/kg (廃プラスチック類と紙ごみをほぼ1:1で混合)

出典) 「新型固形燃料<RPF>」一般社団法人日本RPF工業会HP <http://www.jrpf.gr.jp>

- ・プラスチック類、紙の分別条件

一般廃棄物からプラスチック類と紙ごみを全量、分別すると、残った廃棄物の低位発熱量が低下する。低位発熱量が低下し過ぎると安定燃焼温度を維持できなくなる。焼却炉内でダイオキシン類の分解が促進できる温度領域は850℃以上であり、その安定燃焼温度を維持できる限界の低位発熱量は通常4,200~5,000kJ/kg1) とされている。ここでは、低位発熱量が5,000kJ/kgになるまでプラスチック類と紙ごみを分別するものと仮定する。

出典) 「ごみ処理施設整備の計画・設計要領」全国都市清掃会議、2006.6、P.137

- ・プラスチック類、紙の分別収集量
プラスチック類と紙ごみは1:1で利用する想定とする。
- ・プラスチック類の低位発熱量：36,000kJ/kg
- ・紙ごみの低位発熱量：14,695kJ/kg

出典) 環境省「一般廃棄物処理事業実態調査(平成29年度版)」2019.3

全国都市清掃会議「ごみ処理施設整備の計画・設計要領」2006.6.20から算出

回収量はそれぞれ一般廃棄物中の7.6%に相当し、湿基準に換算した全国平均の組成割合よりも低く、回収は可能である。一般廃棄物の排出量が30 t/日の地域(参考ケース)で、分別収集の徹底により極力、資源回収し、資源化できない廃棄物は最終処分するものとして試算する(表3.1.4)。

表3.1.4 参考ケースのごみ組成と回収量

項目	廃棄物の処理方法	湿基準(%)	回収量(t/日)
プラスチック類	RPF	12.9	3.88
紙・布類	紙類はRPF	28.4 (内、紙類 24.8)	8.53 (内、紙類 7.44)
厨芥類	メタン発酵 残差は焼却処理(広域化)	23.2	6.96
その他	資源回収 及び 焼却処理(広域化)	35.5	10.63
合計		100.0	30.00

廃プラスチック類と紙ごみをほぼ1:1で混合することから、回収した廃プラスチック類に産廃系の廃プラスチック類を混合して、紙ごみと同じ量の7.4 tを確保できるものと仮定し、RPFの製造量は表4.3から、15 t/日(7.4 t/日*2=14.8 t/日)とする。産廃系の廃プラスチック類はこの地域で発生する廃棄物の量30 t/日に追加投入した燃料であるため、この熱量を除いて評価する。RPF中の産廃系の廃プラスチック類の投入量と熱量割合を下記に示す。

・産廃系の廃プラスチック類の量=7.4 t/日-3.9 t/日=3.5 t/日

・RPF中の産廃系の廃プラスチック類の熱量割合

$$= (3.5 \text{ t/日} * \text{Hu1}) / (15 \text{ t/日} * \text{Hu3}) = 32.7\%$$

ここで、Hu1:プラスチック類の低位発熱量:36,000kJ/kg

Hu3:RPFの低位発熱量:25,700kJ/kg

(8) メタン発酵の設定

表3.1.4の厨芥類の回収量から、メタン発酵施設の規模は7 t/日とする。回収したメタンを含むバイオガスは地域熱供給の燃料として使用する。この熱量分を都市ガス削減量に加算する。

メタン発酵の設定条件を以下に示す。

- ・揮発性蒸発残留物(VS)分解率:80%
- ・メタン発生率:0.5Nm³/kg-VS
- ・バイオガス中のメタンガス濃度:60%(熱量:21.50MJ/Nm³)
- ・消化槽加熱温度:35~40℃

出典)井上侑香「新しい生ごみメタン発酵発電システム事業について、バイオマス・廃棄物発電によるエネルギー利用の最前線と課題」S&T出版株式会社、2013.11.22

(9) 低温温水供給の環境負荷と費用対効果の算定方法

- 地域熱ネットワークにより熱供給事業をしている実際のデータをもとに供給熱量のパターンを設定する。
- 水温や冷温水の熱供給条件などの試算条件を設定する。
- 熱バランスを試算し、熱供給量と犠牲にした電力量、削減できる化石燃料¹⁾を求める。

- d. 環境負荷として、化石燃料の熱量換算値、CO₂削減量、原油換算値を試算する。
- e. 年間運転管理費（電気料金、化石燃料費、その他維持管理費、人件費、管理費）を試算する。
- f. 導管の管径を求め、廃棄物処理施設から熱供給プラントまでの導管敷設費を試算し、熱供給のために新たに必要となる設備費を算出する。
- g. 設備費を年間運転管理費で除して、単純投資回収年（費用対効果）を求める。

注1) 廃棄物焼却施設からの熱供給により削減できるエネルギーAは次式で求める。A=B-(C+D)

B: 削減できる燃料: 地域熱供給プラントのボイラー燃料(都市ガス)

C: 温水供給による損失分: 温水供給ポンプの消費電力+給湯用追炊き燃料(50℃から60℃に昇温)

D: 冷水供給による損失分: 抽気蒸気で犠牲にした発電量+吸収式冷凍機の消費電力+返送ポンプの消費電力

(10) CO₂排出量への換算

表3.1.5の値を用いて、CO₂排出量への換算を行った。また、蒸気供給のため犠牲にした発電量=(蒸気供給なしの全量発電量)-(蒸気供給時の発電量)+温水送水ポンプ電力量の評価を行い、熱供給に係る発電・電力消費の増減を考慮した。

表3.1.5 燃料・電力・熱の各種設定値

項目	換算係数	単位	備考
電気事業者CO ₂ 排出係数(平均)	0.000496	t-CO ₂ /kWh	
産業用以外から供給された熱のCO ₂ 排出係数 ^{出典1)}	0.057	t-CO ₂ /GJ	
原油換算係数:電力 ^{出典2)}	0.0002506	kL/kWh	
原油換算係数:熱 ^{出典2)}	0.03509	kL/GJ	
熱利用の化石燃料換算 ^{出典2)}	90	%	ボイラー効率
電力の化石燃料換算 ^{出典3)}	46.0	%	発電効率
都市ガスの熱量 ⁴⁾	0.0448	GJ/ Nm ³	
都市ガスのCO ₂ 排出係数 ^{出典4)}	0.0512	t-CO ₂ /GJ	
C重油の熱量 ^{出典4)}	0.0418	GJ/L	
都市ガスのCO ₂ 排出係数 ^{出典4)}	0.0740	t-CO ₂ /GJ	

出典:1) CO₂排出係数:算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧、温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度2017

出典2) 一般廃棄物焼却施設から熱供給する場合に想定される熱量から設定した規模の铸铁製ボイラーの能力(1,000~10,000MJ/h)における最新のボイラー効率(4社平均値)

出典3) 出典:(社)空気調和・衛生工学会「第13版空気調和・衛生工学便覧 2 汎用機器・空調機器篇」(2001) 各種ボイラー形式の平均値

出典4) 総合エネルギー統計

以上のような条件を基に、焼却炉及び周辺の熱収支を解析して、CO₂排出削減効果を算定する。

3.2.4 熱供給のための建設費用等の推計

(1) 必要になる熱供給関連設備

廃棄物処理施設と熱供給により新たに必要となる設備に分けて、おおよその建設費を算出する。廃棄物処理施設の方式・規模と新たに必要となる熱供給設備の内容を表3.1.6に示す。

表3.1.6 廃棄物処理施設の方式・規模と新たに必要となる熱供給設備

ケース	廃棄物処理施設の方式・規模	熱供給設備の内容
ケース1a	600t/日標準タイプ ^{注1)} 焼却施設	低圧蒸気供給設備 ^{注2)} 蒸気供給配管
ケース1b	600t/日発電設備なし焼却施設	高圧蒸気供給設備 ^{注2)} 蒸気供給配管
ケース2a	600t/日標準タイプ ^{注1)} 焼却施設 (ベースライン)	なし
ケース2b	600t/日水冷コンデンサー式焼却施設	温水供給配管 ^{注3)}
ケース3	30t/日発電なし、水噴射式ガス冷却 タイプ焼却施設をボイラータイプに改 造	廃棄物焼却施設のボイラー 高圧蒸気供給設備 ^{注2)} 蒸気供給配管
参考 ケース	15t/日RPF製造施設 ^{注4)} 7t/日メタン発酵施設	なし

注1) 標準タイプとは空冷コンデンサー、高温高圧化による発電設備の廃棄物処理施設。

注2) 低圧蒸気供給設備、高圧蒸気供給設備は蒸気の安定供給を目的として、バックアップボイラーやアキュムレータを設置。熱利用施設までの蒸気配管の敷設長さは1,000m（架空）と仮定。

注3) 民生系の低温温水供給は既存の地域熱供給ネットワークがあると仮定し、新たに必要となる設備は既存の地域熱供給プラントに温水を供給する配管と送水ポンプ等。温水のバックアップボイラーは既存の地域熱供給プラントにあるものとして、新たに設置しないこととした。配管長さは1,000m（架空）と仮定。

注4) 参考ケースのRPF中には産廃系の廃プラスチック類が熱量換算で32.7%混合しているため、この熱量分が地域で発生する一般廃棄物の熱量に上乗せされている。RPF焼却施設の建設費はおおよそRPFの熱量に比例すると考えられることから、熱量割合で按分し、その金額を差し引いた建設費で評価する。

(2) 各廃棄物処理施設の建設費の算出方法

<標準タイプの廃棄物処理施設>

廃棄物焼却施設の発電設備は抽気をしない状態で容量が設定されるので、ケース1とケース2は同じ建設費になる。

・廃棄物焼却施設全体の建設費 = $45.5 * X - 219$ （百万円）

ここで、X：廃棄物処理量（t/日）

出典）平成30年度「廃棄物の地域熱利用による低炭素エネルギーシステムの検討と評価業務報告書」
P. 60

<水冷コンデンサータイプの廃棄物処理施設>

水冷コンデンサーと空冷コンデンサーの価格比較の情報⁴⁾を表3.1.7に示す。熱交換量1MJ/hあたりの価格差を算出し、下記の式により標準タイプの廃棄物処理施設において、空冷コンデンサーを水冷コンデンサーに置換えた場合の価格差（減額）を求める。

・水冷コンデンサーに置換えた場合の価格差（減額）（千円） = $1.172 * Q$

ここで、Q：コンデンサーの熱交換量（MJ/h）

ただし、廃棄物処理施設全体の価格差は、上記で求めたコンデンサーの価格差（減額）に温水供給ポンプ、冷却水循環ポンプ（温水の回収がない場合の冷却水供給用）の価格を加算する。

表3.1.7 水冷コンデンサーと空冷コンデンサーの価格比較

種類	交換熱量 (MJ/h)	設備費 (千円)	1MJ/hあたりの設備費 (千円/(MJ/h))
空冷コンデンサー	25,600	80,000	3.125
水冷コンデンサー	10,240	20,000	1.953

<発電なし、高温高压化なしの廃棄物処理施設>

標準タイプの廃棄物処理施設に対して、発電設備の建設費が削減される。削減率は標準タイプの建設費全体価格の13%

さらに、発電しないので、蒸気を高温高压化しないことにより建設費が削減される。削減率は標準タイプの建設費全体価格の1%

RPF焼却施設の建設費はRPFの発熱量比で換算した廃棄物処理量X (t/日) で算出する。

・発電設備が不要な場合の建設費 = $(45.5 * X (t/日) - 219) * (1 - 0.14)$ (百万円)

出典) 平成30年度「廃棄物の地域熱利用による低炭素エネルギーシステムの検討と評価業務報告書」

3.3 焼却施設における排ガス系からの潜熱回収の可能性の検討

欧州を中心に第4世代地域熱供給と呼ばれる、50℃～60℃の低温の温水で地域熱供給を行うことが試みられているが、このような低温温水であれば、排ガスに含まれる水の蒸発潜熱分も含めて熱回収することが可能となる。廃棄物焼却時の燃焼温度は850℃～950℃になり、廃棄物中の水分は焼却熱により水蒸気になり、この時周囲より蒸発潜熱を奪う。水蒸気は排ガスと共に焼却炉から出て行き、ボイラーで熱回収される。ただし、ボイラーや排ガス処理装置の低温腐食の問題から結露しない温度(150℃)以上に保たれ、排ガス中の水分は水蒸気のまま(潜熱を持ったまま)煙突から放出される。

廃棄物焼却施設の中で排ガス中から塩化水素HClや硫黄酸化物SO_xを除去する装置の一つに湿式有害ガス除去装置がある。潜熱回収を目的とした装置でないが、結果的に排ガスの潜熱を回収することができる。ただし、排ガスから回収された熱は空冷冷却器やチラーユニットなどで冷却し、大気に放散している。この熱を温水で回収できる可能性がある。

最近、建設される廃棄物焼却施設は集塵機にバグフィルターが採用されることが多いため、乾式有害ガス除去装置(消石灰噴霧)が多く、湿式有害ガス除去装置(苛性ソーダ噴霧)の事例は少なくなっている。このような状況を踏まえて、排ガス系統からの潜熱回収の可能性や課題について検討する。

3.4 焼却熱産業利用の社会実装に向けた取り組み

社会実装の推進方策に関する検討は、サブテーマ2で実施しているが、社会実装のための活動自体は全サブテーマで一体的に実施しており、課題代表者がサブテマリーダーを兼務しているサブテーマ1においても、その取り組みについて紹介する。

4. 結果及び考察

4.1 エネルギー利用を高度化する理論的検討

4.1.1 焼却熱の産業利用の効率性に関する考察

<エクセルギー効率の観点>

エネルギーの供給・消費システムの効率性を考える際には、エネルギーの量と質の両面を考える必要がある。エアコンや給湯に利用されるヒートポンプが、投入する電力の持つエネルギー量以上の熱量を供給できるのは、エネルギーの質の面が影響している。エネルギーの質を表す指標として、エクセルギー率が用いられる。エクセルギーは、仕事として取り出し得るエネルギーを指しており、総てのエネルギーのうち、エクセルギーが占める割合がエクセルギー率である。理論的に、電気はその総てを仕事に変換することができるため、エクセルギー率100%のエネルギーである。光のエネルギーや、化合物などが持つ化学エネルギーも、エクセルギー率の高いエネルギーである。一方熱のエネルギーは、温度、正確には環境温度(例えば外気温)からの温度差によって、エクセルギー率が異なることになる。図

4.1.1に、環境温度が20°Cの場合の、温度別の熱エネルギーが持つエクセルギー率を示す。環境温度においてエクセルギー率はゼロで、環境温度からの乖離が大きくなる高温ほど、エクセルギー率は高くなる。仮に熱力学的に理想的なヒートポンプが存在すれば、熱のエクセルギー率の値の分だけ電気のエネルギーを供給すれば、その温度の熱を供給できる。暖房程度の熱であれば、供給したい熱量のわずかな数の電力を供給すればよいことになるが、実際のヒートポンプの性能は、理想値からの乖離がまだまだ大きい。それでも、直接化石燃料を燃焼させて暖房するケースに比べて、はるかに効率的に熱供給を行うことができる。

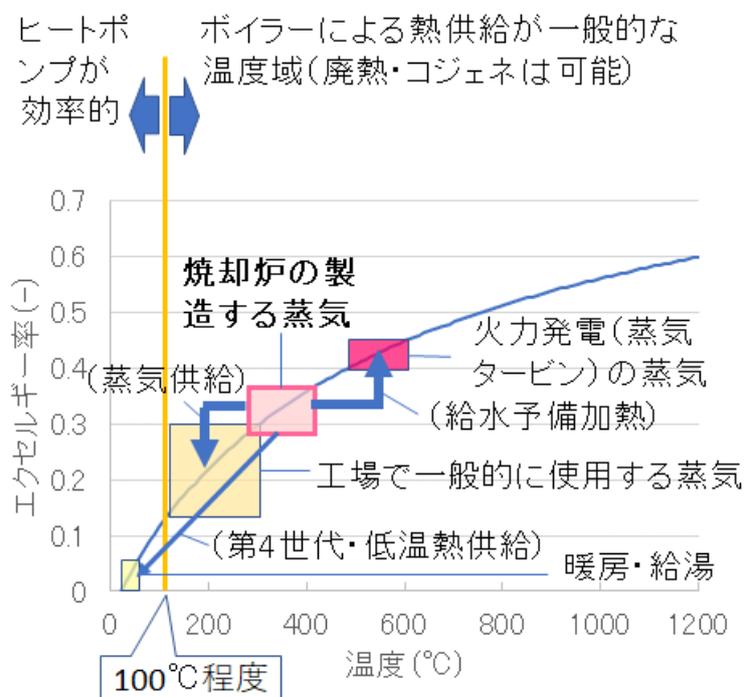


図4.1.1 エクセルギー効率と焼却炉で製造される蒸気の関係性

焼却炉で製造できる蒸気は、おおよそ300°C～400°Cの温度帯である。より高温化すると、燃焼ガスによるボイラー過熱器の高温腐食の問題が顕著になるため、更なる高温化は容易ではない。火力発電所で用いられる蒸気は600°C程度までであるが、これを700°C程度まで高める技術開発も行われている状況である。また、図に示す領域の範囲外になるが、ガスタービンで利用されるガスの燃焼温度は、1500°Cに達する。同じ量の熱エネルギーでも、温度によってエクセルギー率が異なるため、電力として取り出せる割合は大きく異なることになる。加えて火力発電所と焼却炉では、規模の違いや蒸気の冷却方式の違い等によって、更に発電効率に開きができる。

焼却炉で製造する熱は様々な用途に使用し得るが、エクセルギー率の高い、より高温の熱需要を満たす方が、理論的にはエネルギーの有効利用に繋がる。焼却炉の熱を、より高温で運転される火力発電所の発電に直接利用することはできないが、発電所の給水の予備加熱に用いることはできる²⁾。これにより、焼却熱が最終的には火力発電所の高温・高圧の蒸気を製造するために利用されることになり、効率的である。発電と熱供給を同時に行うコジェネレーションプラントへの熱供給も、原理的には可能である。一方、化学、ゴム、建材、食品などの様々な工場において、製造プロセスで蒸気が利用されている。一般的には100°C～300°C程度の温度帯の蒸気が多く、焼却炉で製造できる蒸気の温度よりも低いため、焼却炉から容易に蒸気を供給することができる。一方で、前述のようにヒートポンプによる供給が難しいか、効率的ではない温度領域であるため、現在でもボイラーで燃料を燃焼させて蒸気を製造しているケースが多い。化石燃料自体はエクセルギー率が95%程度以上ある高品質なエネルギーであるが、これを直接燃焼させて、エクセルギー率が15～30%程度の蒸気を製造することになるので、大きなエクセルギーロスが生じている。この温度帯の熱需要を焼却熱で置き換えることができ

ば、化石燃料の非効率な使用を減らすことが出来る。例えばボイラーで使用されているのが都市ガスであれば、ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせた複合サイクルの発電システムにより、60%前後の高い発電効率で発電を行うための燃料として使用できるポテンシャルがあり、ボイラーに用いるのはエクセルギーの無駄が大きい。このように、現在の技術では化石燃料を非効率に利用せざるを得ないプロセスを、廃棄物の持つエネルギーで置き換えることができれば、代替される化石燃料が高いエクセルギー率で利用される間接的な効果を含めて、社会全体としてのエクセルギー効率の向上に貢献することが出来る。

焼却炉からの暖房や給湯のための熱供給は、前述のようにエクセルギー効率の観点からは効率が良くない。発電と熱供給を併用するコージェネレーションであっても、熱供給のために発電量が犠牲になるが、仮にその減少分と等価な電力でヒートポンプを駆動して熱供給を行った場合と比較して、供給できる熱量に大きなメリットはないか、温度帯によってはむしろ熱量が低下する場合もあるため、エネルギーバランスを慎重に検討する必要がある。しかし、焼却炉から供給する熱が現状では廃棄している熱であれば、追加的な化石燃料消費の削減が期待できる。近年、第4世代地域熱供給と呼ばれる、50～60℃程度の低温の地域熱供給が試行され始めている。環境温度との温度差を減らして配管等からの放熱を防ぐとともに、ヒートポンプを接続して効率的に熱供給することや、廃熱を活用する機会が増大することなどが期待される。この温度帯であれば、焼却炉で発電する際に水冷コンデンサーで回収される熱や、炉壁等を冷却する際に回収される熱を利用することができる。既に発電を行っている焼却炉であれば、発電量を犠牲にすることなく熱供給を行うことが可能になる。温水供給のためのポンプのエネルギー消費を上回る、エネルギーの代替効果が見込めるのであれば、低温の熱供給は有効な対策となり得る。ただし、工場の蒸気と異なり、低温熱の供給は需要家が小規模な建物や住宅等であるケースが多いため、熱供給のための配管網の建設が、供給される熱の持つ経済的価値と比べて、相対的に高額になりがちである点には留意する必要がある。

熱利用の対策として従来一般的に検討されてきた廃熱利用は、経済的に成立することが困難なケースが多い。廃熱は、量的には多く発生しているが、エクセルギー量として無駄が多い訳ではない。本研究では、社会全体としてエクセルギーの無駄を減らす熱利用方法を提案しており、結果的に経済的にも非常に効率的な技術とすることが可能である。

<将来のエネルギーシステムとの親和性と経済的価値の観点>

現在国内の電力の多くは、化石燃料を燃焼させる火力発電によって供給されている。蒸気タービンの600℃や、ガスタービンの1500℃といった高温であっても、熱のエクセルギー率が1から大きく乖離しているため、火力発電では熱損失が不可避である。蒸気タービンによる発電であれば、ボイラーにおける熱損失もあるが、特に蒸気の復水器における熱損失が不可避であるため、全体で60%前後の熱が電気に変換することなく失われる（図4.1.2）。このような熱損失の存在や、発電のための高価な施設の建設や運転が必要であること、そして電気は様々な用途に利用可能なエクセルギー率100%の質の高いエネルギーであることから、同じエネルギー量でも、熱に比べて電気の価値が高い。しかし、低炭素、脱炭素社会の実現に向けて、再生可能エネルギーが主流化する将来においては、太陽光発電や風力発電等によって、まず電気が供給されることになる。これらの電源による発電単価は、将来は火力発電の発電単価（化石燃料価格に大きく依存するが、概ね10円/kWh程度）を下回ることが想定されている³⁾。海外の事例では、日照量が日本よりも5割ほど多い中東の乾燥地域ではあるが、土地の使用や税制面での優遇制度も相まって、現時点でも既に太陽光発電の単価が3円/kWh程度となっているケースもある⁴⁾。CO₂排出が制限される将来においては、熱も再生可能エネルギーや循環資源から供給される必要がある。廃棄物やバイオマスの燃焼だけでは不足する熱は、暖房や給湯目的だけでなく、工場で消費する蒸気も含めて、電力から供給することは、環境面だけでなく経済的にも合理的になる可能性がある。その際、電力から蒸気への変換は、量的なエネルギーの損失はほとんどない状態で行うことが可能であるが、それでも変換のための装置が必要であり、そこに追加コストが生じる。将来は、ヒートポンプの適用が困難な高温の熱については、とりわけ太陽光発電の発電量が豊富な日中において、電力よりも蒸気が高価にな

る可能性もあると思われる。焼却炉においてまず製造されるのは蒸気であるため、将来は蒸気を蒸気のまま供給することの価値が、一層高まると考えられる。

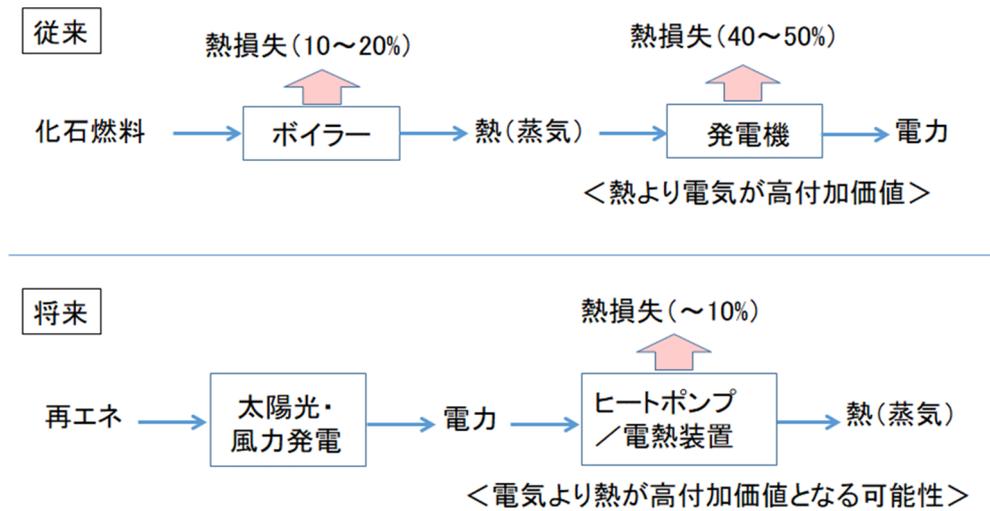


図4.1.2 電気の熱の価値の比較（現状と将来）

将来的には、工業団地の熱需要を低炭素、あるいは脱炭素な手段で満たすシステムに転換するために、従来の発電と蒸気供給を並行して行うコジェネレーションに加えて、焼却熱の利用を積極的に行い、更に太陽光発電の余剰電力など、再生可能エネルギーを積極的に利用することが望ましい。これには熱供給インフラの大幅な変更が必要になるが、費用対効果に優れる焼却施設から製造工場への蒸気供給は、転換を促すトリガーになり得ると考えられる。工業団地において、熱供給インフラをシェアして設備投資を低減し、エネルギー需給に関わる情報をシェアして安定かつ効率的な運用を可能にし、エネルギー自体をシェアして経済性を高めながら、低・脱炭素化を進める産業スマートエネルギーシェアリング（図4.1.3）を展開してゆくことが重要であると考えられる。

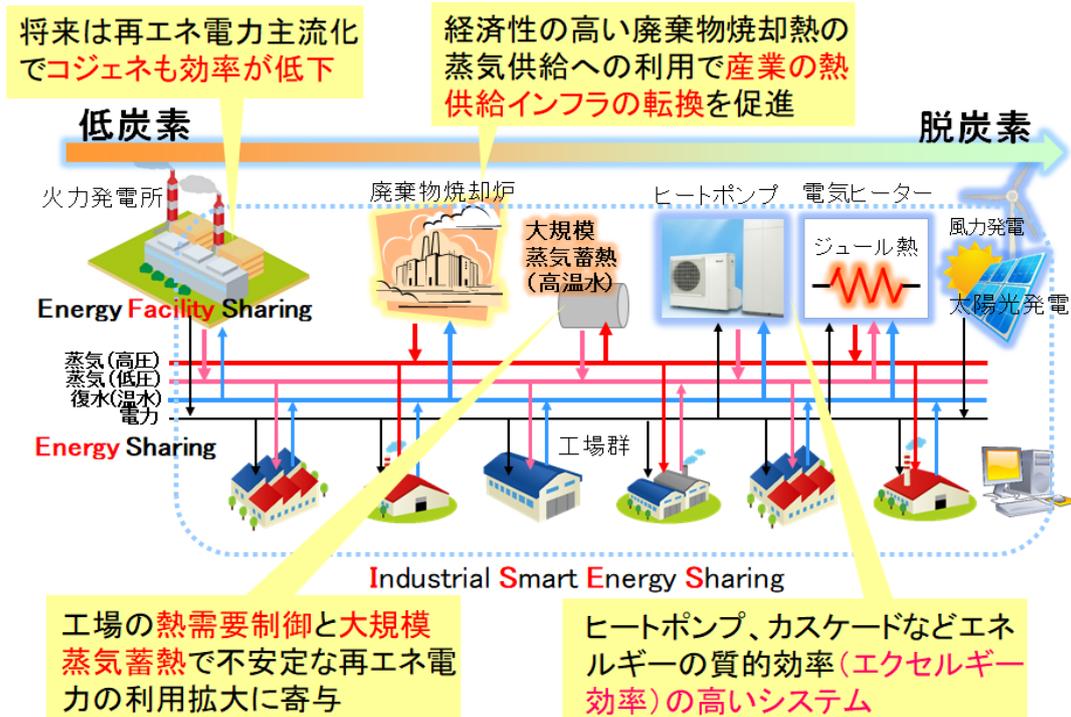


図4.1.3 焼却熱の利用を中核として産業の脱炭素化を推進する産業スマートエネルギーシェアリング

4.1.2 低炭素効果の評価方法の改善

資源のLCAの評価方法は、従来のLCAの枠組みを大きく逸脱するものではなく、リサイクルの評価であれば、循環資源によって代替される新規資源の社会における価値を端的に示すプロセスを、システム境界内に加えて評価するものである（図4.1.4）。従って、従来のLCAのツールやデータベースを使って容易に評価が行える利点がある。これだけの簡易な計算で、廃棄物を含めて資源の社会における適材適所での利用に繋がる評価を行うことができる。廃棄物からのエネルギー回収を例にすると、従来のLCAでは、CO₂排出係数の大きな石炭ボイラーからの熱供給を代替するケースのCO₂削減効果が大きく評価されるが、資源のLCAでは、ガスが複合サイクルによる高効率発電で利用できるという、代替される資源の価値を含めて評価するため、ガスボイラーからの熱供給を代替するケースのCO₂削減効果がより大きく評価されることになる。本研究は、上海、香港などの研究者との国際共同研究であり、成果はResources Conservation and Recycling誌に掲載された。本研究で提案する資源の有効利用の考え方をベースにして、社会実装の推進に向けた国際的な研究プロジェクト実施の検討を始めている。

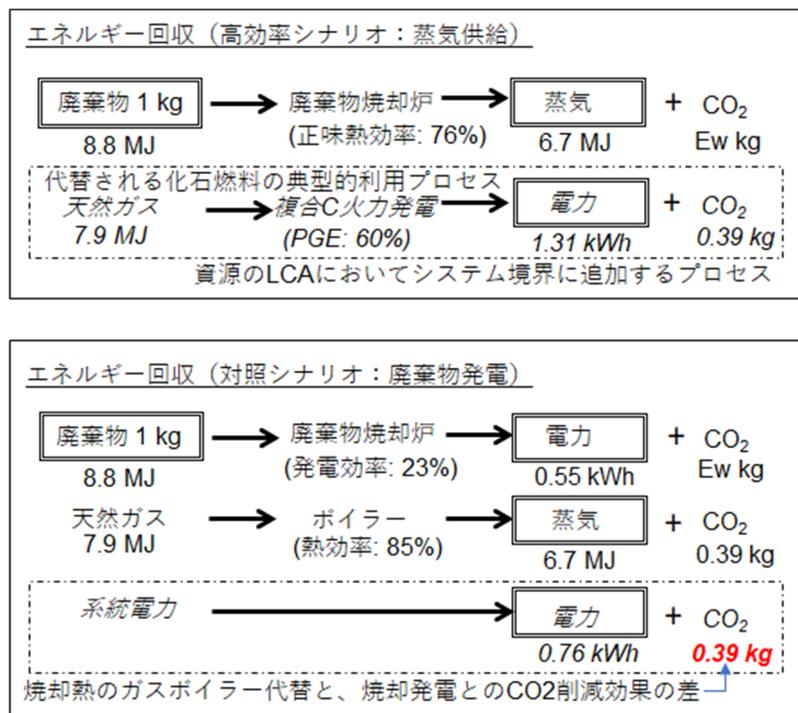


図4.1.4 資源のLCAの評価の枠組みにおける廃棄物からのエネルギー回収シナリオのシステム境界

4.2 地域特性別の効率的な熱利用システムの検討

4.2.1 人工知能を活用した小型焼却炉の連続運転による工場への安定的な蒸気供給の可能性

小型の焼却炉は、バッチ式の間欠運転が行われるために安定した熱供給が困難であり、規模が足りないために、発電効率を高めることも難しく、費用対効果に劣るために、エネルギー回収が行われてこなかった経緯がある。しかし、近年の情報技術や人工知能を活用して、焼却施設の遠隔運転や自動運転が可能となりつつある。また、蒸気はアキュムレータと呼ばれる高圧タンクに高温水として貯蔵することが可能であり、半日程度といった時間範囲であれば、変動を緩和させることもできる。加えて、焼却施設の点検等による稼働停止時も含めて、焼却施設からの蒸気供給が不足する場合に備えて、バックアップボイラーを持つことが望ましいが、ボイラーも遠隔自動運転が可能となっている。これら利用可能な技術の現状を考慮すると、小型焼却炉であっても遠隔又は自動運転により連続運転を行い、効率的な蒸気供給を安定的に続けるシステムを構築することが可能である（図4.1.5）。本システムについては、焼却施設の製造メーカーにもヒアリングを行い、十分可能であるとのコメントを得ている。

小型焼却炉の自動連続運転

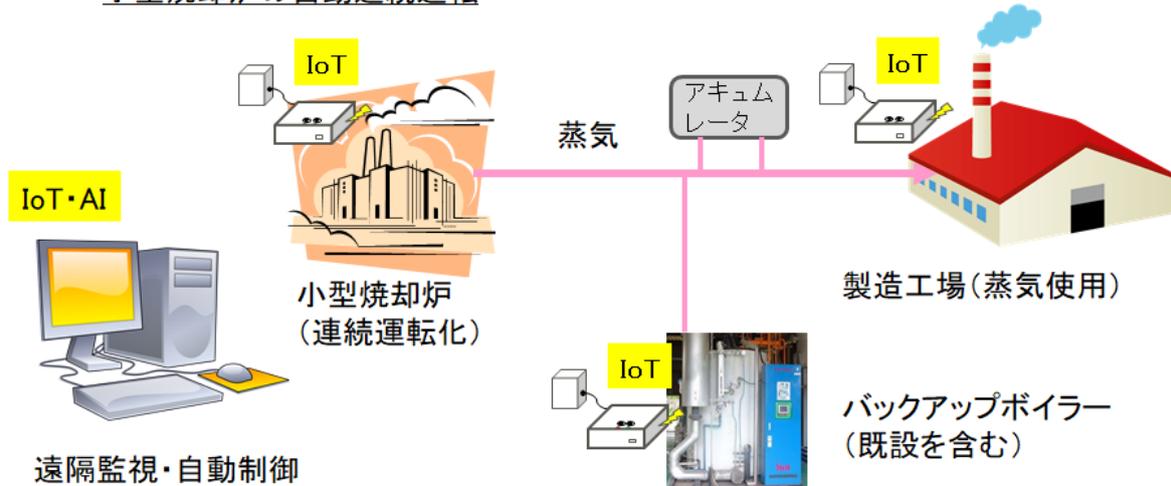


図4.1.5 小型焼却炉及び付帯設備の遠隔・自動連続運転による高効率な蒸気供給システム

4.2.2 地域特性別の効率的な熱利用システムの検討結果

各ケースにおける廃棄物焼却施設からの供給熱量の試算結果を表4.1.1に示す。従来、発電を行っていたと想定するケース1a及び1bでは、1aにおいて抽気による発電量の15%程度の低下が生じ、1bでは全発電の停止となり、これらも考慮してCO₂排出削減量の評価を行う。

表4.1.1 各ケースにおける熱供給量や発電量

ケース	エネルギー利用の形態	蒸気・温水供給量 (熱利用先における熱量)		発電量 kWh/h	犠牲にした 電力量 kWh/h	ヒートポンプ 電力削減 量 kWh/h
		kg/h、m ³ /h	MJ/h			
ケース1a (600t/日)	発電＋低圧抽気 蒸気工場供給	17,850	44,460	9,670	1,740	0
ケース1b (600t/日)	高圧蒸気 全量工場供給	57,490	172,150	0	11,310	0
ケース2a (600t/日) <i>ベースライン</i>	発電のみ (熱供給なし)	0	0	11,400	0	0
ケース2b (600t/日)	発電＋低温温水 供給	温水665	温水25,830	11,650	240	1,793
ケース3 (30t/日)	高圧蒸気 全量工場供給 (ボイラー後付け)	2,880	7,750	0	0	0
参考ケース (30t/日)	RPF メタン発酵 (ガスは熱利用)	3,250	8,760	0	365	0

各ケースにおける年間のCO₂排出削減効果を表4.1.2に示す。焼却施設からの蒸気供給を行う製造工場のボイラーが、都市ガスを燃料としている場合と、C重油を燃料としている場合に2通りを評価している。また、C重油を代替する場合について、廃棄物1t当たりのCO₂排出削減効果を図4.1.6に示す。発電量当たりのCO₂排出量の大きなC重油を代替する方が、CO₂排出削減効果は大きく算定される。大型の焼却施設（600t/日）において発電を停止して高圧蒸気的全量を製造工場に送るケース1bにおいて、特に大きな削減効果が得られ、発電のみを行うケース2a（ベースライン）に比べて、C重油を削減するケースでは2倍程度の削減効果となる。一方、発電を犠牲にしない低温温水を民生系の建物に送るケース2b

では、現在利用が拡大し、今後主流になると考えられるヒートポンプによる熱供給を代替するという想定（ヒートポンプは効率的に熱供給できるため、削減効果が少なくなる）や、低温温水で給湯する場合には、ガスボイラーで追い炊きをするという設定で、このガス消費が影響するために、CO₂はわずかに増加するとの結果となった。加温を必要としない暖房用途に限定すれば、熱需要量の大きさに応じて、ある程度のCO₂排出削減効果が得られる可能性はある。一方、従来効率的なエネルギー回収が困難であった小規模な焼却施設（30t/日）にボイラーを後付けし、製造する蒸気の全量を製造工場に送る想定の場合3では、廃棄物1トン当たりのCO₂排出削減効果が、大型焼却施設の場合と同様に、高効率発電を行う場合の2倍程度大きくなり、小型焼却施設において製造工場への蒸気供給は極めて効果的な手段になり得ることが分かる。また、近隣に蒸気需要がないケースでは、固形燃料化やメタン発酵を組み合わせることで、高いCO₂排出削減効果が期待できる。

表4.1.2 各ケースにおけるCO₂排出削減効果

（熱供給は、都市ガスボイラーを代替する場合と、重油ボイラーを代替する場合をそれぞれ算定）

ケース	発電と熱供給の形態	熱供給CO ₂ 削減効果 (都市ガス代替)	熱供給CO ₂ 削減効果 (C重油代替)	発電のCO ₂ 削減効果	CO ₂ 削減効果の合計 (都市ガス代替)	CO ₂ 削減効果の合計 (C重油代替)
		t-CO ₂ /年	t-CO ₂ /年	t-CO ₂ /年	t-CO ₂ /年	t-CO ₂ /年
ケース1a (600t/日)	発電+抽気蒸気工場供給	10180	14713	32231	42411	46945
ケース1b (600t/日)	高圧蒸気全量工場供給	59028	85313	0	59028	85313
ケース2a (600t/日) <i>ベースライン</i>	発電のみ (熱供給なし)	0	0	37998	37998	37998
ケース2b (600t/日)	発電+低温温水供給	-370	-370	37998	37628	37628
ケース3 (30t/日)	高圧蒸気全量工場供給 (ボイラー後付け)	3030	4379	0	3030	3030
参考ケース (30t/日)	RPF メタン発酵 (ガスは熱利用)	2040	2948	0	2040	2040

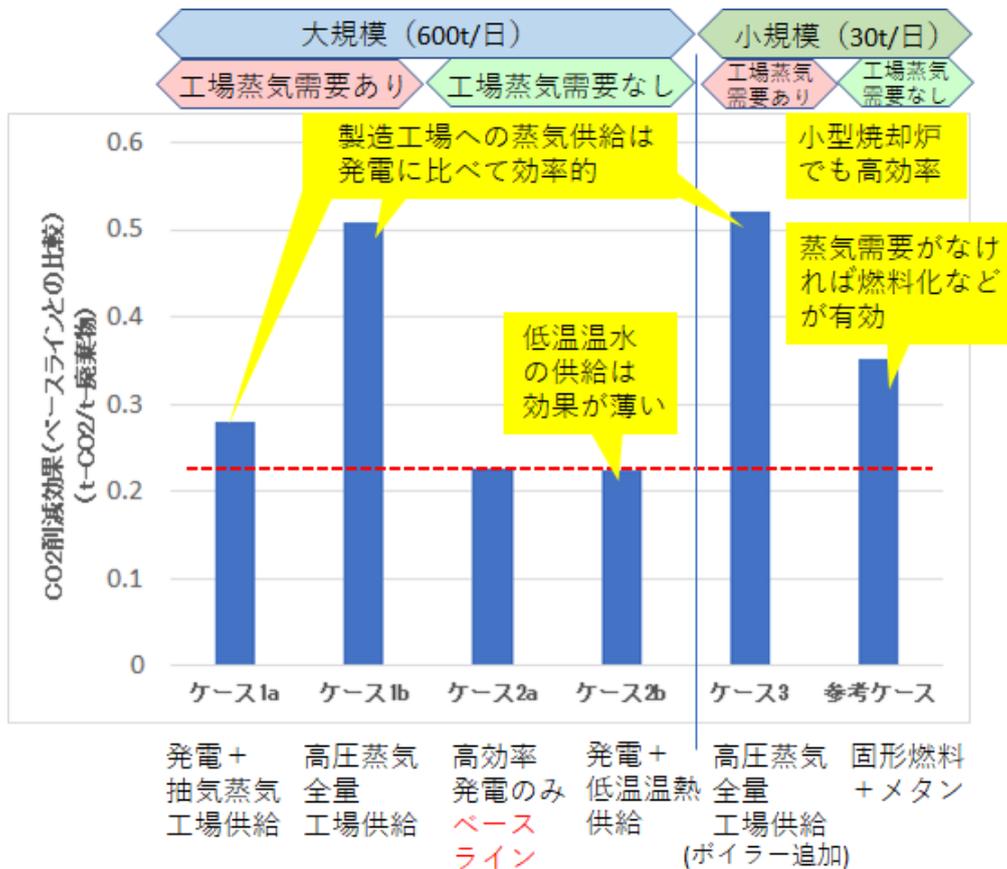


図4.1.6 各ケースにおける廃棄物1t当たりのCO₂排出削減効果
(蒸気供給が製造工場で消費するC重油を削減する場合)

熱供給のために新たに必要となる機械設備費を表4.1.3に、建設費を表4.1.4にそれぞれ示す。蒸気の安定供給のためにアキュムレータを設置する想定としたが、この費用が全体に占める割合が大きい。運転状況によってはアキュムレータを省略できる可能性もある。また、バックアップボイラーの設置費用を計上しているが、製造工場の既存のボイラーを利用できる場合は、この費用を割り引いて考えることもできる。なお前述のように、参考ケースにおいては外部の施設に処理を依存する必要があることから、建設費や運転経費を正確に見積もることが難しいため、算定対象外とした。

表4.1.3 各ケースで熱供給により新たに必要となる機械設備費 (内訳) 単位：百万円

ケース	発電と熱供給の形態	バックアップボイラー	アキュムレータ	ドレンタンク	ドレン返送ポンプ	機械設備合計	据付け工事費	電気計装工事
ケース1a (600t/d)	発電+抽気蒸気工場供給	38.7	59.8	2.3	0.4	101.1	15.2	20.2
ケース1b (600t/d)	高圧蒸気全量工場供給	126.7	276.1	6.9	0.7	410.4	61.6	82.1
ケース2a (600t/d)	発電のみ(熱供給なし)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ケース2b (600t/d)	発電+低温温水供給	21.9	0.0	0.0	5.3	27.2	4.1	5.4
ケース3 (30t/d)	高圧蒸気全量工場供給(ボイラー後付け)	7.9	35.3	0.5	0.3	201.0 ¹⁾	6.6	8.8

注1) ケース5rの機械設備費には廃棄物焼却施設のボイラーの設備費 (157百万円) を含む。

表4.1.4 各ケースで熱供給により新たに必要となる建設費 単位：百万円
(配管敷設に関わる用地代を考慮していない)

ケース	発電と熱供給の形態	設備費合計	建築費	導管敷設費	総建設費	1t当たりの建設費
ケース1a (600t/d)	発電+抽気蒸気 工場供給	136.5	43.1	36.1	215.6	0.359
ケース1b (600t/d)	高圧蒸気 全量工場供給	554.1	129.2	64.2	747.5	1.246
ケース2a (600t/d)	発電のみ (熱供給なし)	0	0.0	0	0.0	0.000
ケース2b (600t/d)	発電+ 低温温水供給	36.8	20.9	138.9	196.5	0.328
ケース3 (30t/d)	高圧蒸気 全量工場供給 (ボイラー後付け)	221.5	5.2	26.7	248.2	8.273

次に、熱供給に伴って削減される燃料代や、発電量の低下等に伴い低下する売電料金や電力購入代金等を、表4.1.5に整理する。発電のみを行うケース2aは、比較のためのベースラインとして設定したケースであり、熱供給を行わないため運転・管理費の変動はない。

表4.1.5 各ケースにおける運転・管理費 単位：千円/年

ケース	発電と熱供給の形態	削減する経費 (正の値：削減)			増加する経費 (正の値：増加)				
		都市ガス料金	電気料金	削減経費の合計	電気料金	人件費	維持補修費	管理費 ¹⁾	増加する経費の合計
ケース1a (600t/d)	発電+抽気蒸気 工場供給	476,800	0	476,800	182,300	3,600	9,010	29,460	224,400
ケー1b (600t/d)	高圧蒸気 全量工場供給	1,661,600	0	1,661,600	1,014,500	3,600	30,195	64,710	1,113,000
ケース2a (600t/d) ベース	発電のみ (熱供給なし)	0	0	0	0	0	0	0	0
ケー2b (600t/d)	発電+ 低温温水供給	-209,000	188,200	-20,700	5,400	3,600	9,000	1,840	20,200
ケース3 (30t/d)	高圧蒸気 全量工場供給 (B後付)	83,100	1,700	83,100	1,700	3,600	3,800	8,140	15,500

熱供給による社会全体（焼却施設と製造工場の合計）の費用対効果を単純投資回収年で示す（表4.1.6）。単純投資回収年は総建設費を年間経費の削減額で除して、初期投資を何年で回収できるかを求めたものである。ベースラインとしての高効率発電のみを行うケース2aでは、費用の変化はない。低温温熱の供給を行うケース2bでは、運転・管理費が増加するため、初期投資が回収されない結果となった。試算結果から下記のことが言える。

- a. 従来発電を行っている大型焼却施設は、抽気蒸気を製造工場に供給する場合でも、発電を停止して高圧蒸気的全量を製造工場に供給する場合でも、単純投資回収年が2年以下であり、経済性が高い対策と言える。ただし、現在の想定（距離1km、架空配管）で熱導管の建設費が1～2割を占めて

いるが、焼却施設と製造工場の距離や配管設置工事の困難さ等により、投資回収年数が増加する可能性がある。

- b. 発電を犠牲にしない低温温水の供給は、代替するのがヒートポンプであり、温度の不足分を補うために天然ガスで追い炊きする想定から、費用の増加に繋がっている。そうでなくても、
- c. 小型の焼却施設にボイラーを後付けし、製造工場に蒸気供給を行うケース3では、単純投資回収年が相対的に長くなるものの、それでも数年で回収できる可能性があることが示された。

表4.1.6 各ケースにおける焼却施設からの熱供給の経済性評価の結果

ケース	発電と熱供給の形態	熱供給設備の総建設費 (百万円)	年間経費の削減額 (千円/年)	単純投資回収年 (年)
ケース1a (600t/d)	発電+抽気蒸気 工場供給	215.6	252,500	0.85
ケース1b (600t/d)	高圧蒸気 全量工場供給	747.5	548,600	1.36
ケース2a (600t/d)	発電のみ (熱供給なし)	0.0	0	—
ケース2b (600t/d)	発電+ 低温温水供給	196.5	-41,000	回収できない
ケース3 (30t/d)	高圧蒸気 全量工場供給 (ボイラー後付け)	248.2	69,280	3.58

以上のように、研究計画に沿って、

4.3 焼却施設における排ガス系からの潜熱回収の可能性の検討

4.3.1 熱回収の方法

低温温水を回収する方法として水冷コンデンサーからの熱回収と機器冷却水からの熱回収が考えられる(図4.1.7)。水冷式復水器では、蒸気タービン排気から50℃の温水を回収することができる。また、廃棄物焼却施設では主に下記の機器を冷却水で冷却している。機器を冷却し、水温が上昇(約5℃)した冷却水はクーリングタワーで冷却され循環利用されている。

- a. 油圧ユニット(火格子駆動用、ごみ投入扉駆動用)
- b. 誘引送風機の軸受け
- c. ボイラー給水ポンプの軸受け
- d. 空気圧縮機: インタークーラー、アフタークーラー(計装用、雑用)
- e. 炉用ITV(監視カメラ)、ボイラー水面計ITV(監視カメラ)
- f. ボイラーのブロー排水クーラー、連続ブロークーラー
- g. 蒸気タービン潤滑油クーラー、発電機クーラー
- h. 焼却炉水冷壁(水噴射式廃棄物焼却施設の場合)

注) ボイラー式廃棄物焼却施設の場合は、水冷壁を冷却する熱はボイラーの放射伝熱管と同じ系統に集合され、ボイラー出口蒸気の熱量の一部とされている。

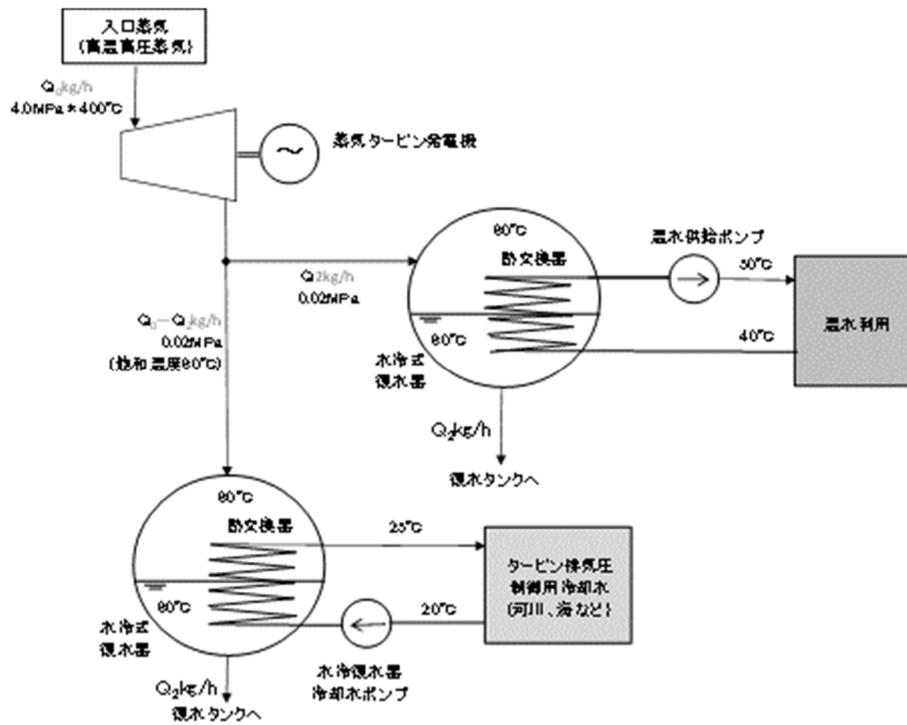


図4.1.7 潜熱回収システムの概略図

4.3.2 潜熱回収を含む低温温水利用の効果

回収した50°C程度の低温の温水は、暖房や給湯に利用することができる。給湯では追い炊きが必要になる場合もある。また、夏季は冷房需要となるが、現状では低温の温水から効率的に冷温水を製造する技術は普及していない。そこで、東京都港清掃工場から周辺地区に実際に熱供給を計画しているデータをもとに、仮想の熱需要として表4.1.7に示す温・冷熱の需要がある条件で、冷房には抽気蒸気を利用し、吸収式冷凍機で冷温水を製造する想定をした上で、温・冷熱の地域供給がヒートポンプによる電力消費を削減する想定で、そのCO₂排出削減効果を評価した（図4.1.8）。紙面の都合により計算条件の詳細は割愛するが、それぞれの期間の2つの棒グラフの差が、CO₂排出削減効果を表す。夏の冷熱需要のピーク時を除いて、CO₂排出の削減に効果があるとの試算結果となった。しかし、熱供給のための初期投資の単純投資回収年数は20年以上と見積もられ、施設の耐用年数を考えると収益の上がる事業としては成立しない可能性が示唆された。

表4.1.7 期間別の温熱及び冷熱の需要 単位：MJ/h

期間	暖房負荷:A	給湯負荷:B	温水需要合計:A+B	冷房負荷
期間1:夏ピーク	158	11,224	11,381	86,432
期間2:夏平日	952	13,917	14,870	49,584
期間3:夏休日	476	13,252	13,729	13,123
期間4:冬平日	22,214	23,031	45,245	3,374
期間5:冬休日	8,156	22,367	30,523	628
期間6:中間期平日	7,511	18,157	25,668	8,966
期間7:中間期休日	3,494	17,492	20,986	4,594

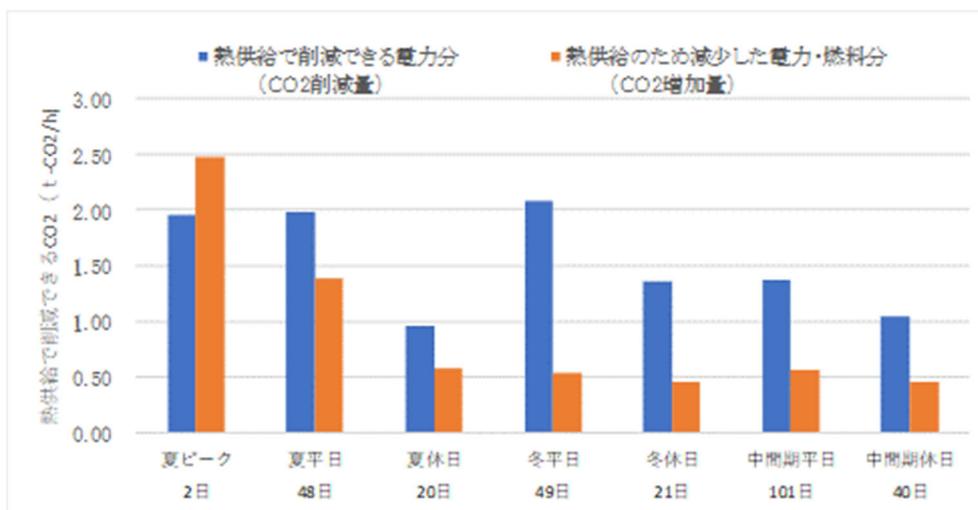


図4.1.8 焼却施設からの温・冷熱の供給によるCO2排出量の増減
(左の棒グラフから右の棒グラフの値を引き算した差が削減効果)

4.4 焼却熱産業利用の社会実装に向けた取り組み

規模の大小に関わらず大きなCO₂排出削減効果と、高い経済性が期待できる焼却施設から製造工場への蒸気供給を、実際に社会で導入するため、多くのステークホルダーとの会合を持ち、そのうちの複数のケースにおいて、事業化を念頭においた具体的連携や、詳細な調査へと移行している。環境省の政策にも貢献しており、国内外で、産官学で連携して社会実装にむけて活動している。表4.1.8に全サブテーマの検討結果を活用して、サブテーマリーダーが中心となって行った活動の一部を示す。

表4.1.8 焼却熱の高度な利用システムの社会実装推進のための活動

カテゴリー	内容
産廃焼却施設から製造工場への蒸気供給の計画支援	<ul style="list-style-type: none"> クレハ環境（株）がいわき市で実施した、焼却炉から化学工場等への蒸気供給に関するフィージビリティスタディーにおいて、検討会の座長を務めるなど、技術面で貢献した。 焼却施設を運転中あるいは計画中の複数の産廃事業者と焼却熱の製造工場での利用の有効性について意見交換を行った。焼却施設周辺の熱需要の調査を行うなど、具体的な取り組みに繋がっている。
自治体焼却施設から製造工場への蒸気供給の計画支援	<ul style="list-style-type: none"> ある自治体の焼却施設から、近隣の大手製造工場への蒸気供給について、双方の担当者を交えて具体的な検討を開始。 産業都市であり、工業団地に一般廃棄物、産業廃棄物それぞれの焼却施設が立地する自治体と協力して、工業団地の熱需要を調査し、事業化に向けた検討に着手。 焼却施設の更新計画を持つ自治体と意見交換を行い、周辺工場の熱需要の調査を進めることを検討中。
産業スマートエネルギーシェアリング研究会の設立・運営への貢献	<ul style="list-style-type: none"> 北九州産業学術推進機構において、産業スマートエネルギーシェアリング研究会が設立され、北九州市立大学、北九州市環境局のメンバーなどと、産業の熱利用を低、脱炭素化することを目的に、事業化の案件抽出や、事業を面展開するために必要なマネジメント機能等について検討。
環境行政への貢献	<ul style="list-style-type: none"> 環境省・中小廃棄物処理施設における廃棄物エネルギー回収方策等に係る検討調査検討会に委員として参画。焼却熱の製造工場での利用は、同委員会が作成したガイダンスでも採り上げられた。

	<ul style="list-style-type: none"> 環境省・廃棄物処理システムにおける低炭素・省CO₂対策普及促進方策検討調査検討会に委員として参画。同委員会では製造工場の熱需要の調査などが行われた。 環境省・廃棄物焼却施設からの余熱等を利用した地域低炭素化モデル事業に貢献。 大熊町での平成31年度脱炭素・資源循環「まち・暮らし創生」FS委託業務ヒアリング会議に委員として参画し、発電を犠牲にしない低温温熱を回収する、第4世代地域熱供給を含む検討において助言。 環境省・廃棄物資源循環学会の主催によるシンポジウム「地域循環共生圏形成における廃棄物エネルギー利用施設の果たす役割と可能性」において、焼却熱の製造工場での利用をテーマに基調講演を実施。 環境省による「低炭素・省CO₂型廃棄物処理システムに係る廃棄物エネルギーの利活用に関する説明会」で講演を実施（ビデオ配信に変更して実施）。
学会における研究成果の普及	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄物資源循環学会誌で「廃棄物の熱エネルギー利用の高度化に向けた展望」と題する特集号を発行
海外展開	<ul style="list-style-type: none"> インドネシア工業省、バンドン工科大学、国立環境研究所の3者で、焼却熱の製造工場での利用に関する研究協力の覚書を締結。焼却施設の経済性を大幅に向上させることで導入を容易にし、廃棄物埋め立ての回避と産業セクターの低炭素化を目指す。日本からは大学や研究機関に加えて現地で都市開発を行う商社や海外展開に意欲のある産廃事業者、現地では複数の自治体などとの協力体制を構築して準備を進めている。 中国清華大学や上海交通大学、中国の公的研究機関、韓国蔚山大学、韓国National Cleaner Production Center、香港城市大学などと、焼却熱の産業利用を含む、スマート産業団地に関する共同研究を実施。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- 大規模な焼却炉に加えて、これまでエネルギー回収の難しかった小規模な焼却炉からも安定して工場に蒸気供給を行い、高い化石燃料消費削減効果を得られる具体的な方法を提示した。その上で地域特性別の効率的な熱利用システムとして、焼却施設から工場への蒸気供給、発電を犠牲にしない低温の熱供給に、固形燃料化やメタン発酵を併用するケースも含めてシステムをモデル化し、CO₂排出削減効果や費用便益を評価して、従来の焼却発電に比べて2倍程度以上効率的な示しており、当初の目的が達成されるとともに、廃棄物分野のエネルギー技術に新たな知見を与える成果である。
- 熱利用の対策として従来一般的に検討されてきた廃熱利用は、経済的に成立することが困難なケースが多い。廃熱は、量的には多く発生しているが、エクセルギー（有効エネルギー）量として無駄が多い訳ではない。本研究では、エネルギー利用を高度化する理論的検討を行い、社会全体としてエクセルギーの無駄を減らす熱利用方法を提案しており、結果的に経済的にも非常に効率的な技術の提案となっている。
- 廃棄物を含む資源の適材適所での利用による、社会全体としての最適化を簡易的に評価することのできる低炭素効果の評価方法の改善手法として、「資源のライフサイクルアセスメント」を提案した。成果は国際学術誌に掲載されるなど学術的にも高く評価されており、当初の目的を達成した。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

- 環境省・中小廃棄物処理施設における廃棄物エネルギー回収方策等に係る検討調査検討会において、焼却熱の製造工場での利用は、同委員会が作成したガイダンスで採り上げられた。また、環境省が主催するシンポジウムや説明会等において、本研究の成果について基調講演する機会を得て報告した。

<行政が活用することが見込まれる成果>

- 財政の逼迫する地方自治体にとって、焼却施設において回収されるエネルギーの販売収益を増やすことは重要な課題である。提案する焼却熱の製造工場での利用は、売電が固定価格買取制度（FIT）により有利に設定されている条件下においても、発電から蒸気供給に切り替えることで、収入の大幅な増加に繋がり得る。発電が困難な小規模な焼却施設でも、ボイラーを後付けして蒸気供給を行えば、熱供給のための追加投資を数年で回収できる可能性が示されており、自治体に効率的な選択肢を提示することができた。
- 廃棄物分野におけるCO₂排出削減対策は、環境行政にとって重要な課題である。これに関わる環境省による複数の委員会に委員として参画するとともに、焼却熱の製造工場での利用については、委員会の中での重要なテーマとしても取り上げられるなど、本研究課題の成果が貢献を果たしている。
- 国が廃棄物焼却施設の建設や改良に対する補助金等の支出を決定する際、効率的な蒸気利用も含めて評価基準とする際の適切な指標化を行う上で、その判断根拠を提供することが期待される。
- 効率的かつ経済的な廃棄物処理施設におけるCO₂排出削減対策として、自治体が本研究を参考にして、焼却施設から製造工場への蒸気供給を計画することが期待される。一部の自治体と既に実施しているが、要望があれば具体的に計画作成等に対して支援することを想定している。

6. 国際共同研究等の状況

- 廃棄物からのエネルギー回収の高度化をテーマに、インドネシア工業省化学製菓繊維産業総局長、バンドン工科大学学長、国立環境研究所理事長の3者で研究協力に関する覚書を締結。また、パレンバン市長、ムシラワスリージョン市長より、研究協力の要請を受けている。途上国で深刻な埋立廃棄物の問題に対応するため、リサイクルが困難で埋立られている廃棄物を対象に、経済性に優れる焼却熱の産業利用を進めることで、途上国にとっては高額な焼却施設の導入を容易にするとともに、産業セクターからの効率的なCO₂排出の削減を進める計画である。国際的な調査・対策等のための予算等（Alliance to End Plastic Wasteに申請中）を活用して検討を進める予定であり、現地で都市開発を行っている日本の商社、現地への進出に意欲のある廃棄物処理事業者等とも連携している。
- 効率的な資源循環や、工業団地の脱炭素化を図るスマートエコ工業団地に関する国際共同研究を、韓国・蔚山大学Hun-Suck Park教授、中国・清華大学Lei Shi教授、中国・上海交通大学Huijuan Dong准教授、香港城市大学Liang Dong講師や、中・館の政府系研究機関等と連携して実施している。共同論文の執筆や、国際シンポジウム開催などの活動を継続している。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) Y. Dou, M. Fujii, T. Fujita, K. Gomi, S. Maki, H. Tanikawa: Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research), vol73(6), p. II_353-II_363 (2017) Potential of Waste Heat Exchange Considering Industrial Location Changes: A Case of Shinchi-Soma Region in Fukushima, Japan
- 2) Y. Dou, S. Ohnishi, M. Fujii, T. Togawa, T. Fujita, H. Tanikawa, L. Dong: Journal of Cleaner Production 170, 548-558. (2018) Feasibility of developing heat exchange network

between incineration facilities and industries in cities: Case of Tokyo Metropolitan Area

- 3) Y. Dou, K. Okuoka, M. Fujii, H. Tanikawa, T. Fujita, T. Togawa, L. Dong: *Frontiers in Energy*, 12 (3), 411-425 (2018) Proliferation of district heating using local energy resources through strategic building-stock management: A case study in Fukushima, Japan.
- 4) L. Sun, Z. Li, M. Fujii, Y. Hijioka, T. Fujita: *Frontiers in Energy*, 12 (3), 400-410 (2018) Carbon footprint assessment for the waste management sector: A comparative analysis of China and Japan.
- 5) L. Sun, M. Fujii, T. Tasaki, H. Dong, S. Ohnishi: *Resources, Conservation and Recycling*, 139, 289-296 (2018) Improving waste to energy rate by promoting an integrated municipal solid-waste management system.
- 6) M. Fujii, Y. Dou, L. Sun, S. Ohnishi, S. Maki, H. Dong, L. Dong and R. Chandran: *Resources, Conservation & Recycling*, 149, 586-594 (2019) Contribution to a low-carbon society from improving exergy of waste-to-energy system by upgrading utilization of waste
- 7) 牧誠也, 大西悟, 藤井実, 後藤尚弘, 五味馨: 廃棄物資源循環学会論文誌, 30, 153-165 (2019) 地域特性を考慮した収集運搬による費用・CO2 排出量推計のための修正グリッドシティモデルの開発-愛知県を対象としたケーススタディ-
- 8) L. Sun, M. Fujii, Z. Li, H. Dong, Y. Geng, Z. Liu, T. Fujita, X. Yu, and Y. Zhang: *Technological Forecasting & Social Change*, 151, (2019) Energy-saving and carbon emission reduction effect of urban-industrial symbiosis implementation with feasibility analysis in the city

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 藤井実: 廃棄物資源循環学会誌, 29 (3), 202-208 (2018) 廃棄物収集・エネルギー回収高度化への情報技術の活用
- 2) 藤井実、松岡浩史: *INDUST*, 33 (5), 7-12 (2018) イノベーション創出に向けた廃棄物処理・リサイクルIoT導入促進協議会の活動
- 3) 藤井実: *環境浄化技術*, 18 (1), 63-66 (2019) リサイクル分野でのIoT、AI導入の展望
- 4) 藤井実: 廃棄物資源循環学会誌, 30 (4), 233-238 (2019) 廃棄物のエネルギー利用の高効率化に向けた展望
- 5) 大西悟: 廃棄物資源循環学会誌, 30, (4), 270-276 (2019) 韓国・地域EIPセンターが促す焼却熱の工場利用の実態

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) R. Inaba, T. Tasaki, M. Fujii, N. Yamaguchi: The 9th biennial conference of the International Society for Industrial Ecology (ISIE), Chicago (2017) Estimation of environmental and economic effects of integrating municipal solid waste incinerators in a Japanese region
- 2) S. Ohnishi, M. Fujii, Y. Dou: The 9th biennial conference of the International Society for Industrial Ecology (ISIE), Chicago (2017) Energy recovery system from municipal solid waste as symbiotic network hubs
- 3) Y. Dou, M. Fujii, S. Ohnishi, T. Togawa, L. Sun, H. Tanikawa, T. Fujita: The 9th biennial conference of the International Society for Industrial Ecology (ISIE), Chicago (2017) Network Planning and Assessment System for Multi-Source Waste Heat Exchange Based on Urban

Symbiosis: A Case of Tokyo Metropolitan Area

- 4) M. Fujii, S. Ohnishi, R. Inaba, Y. Dou, L. Sun, S. Maki: The 9th biennial conference of the International Society for Industrial Ecology (ISIE), Chicago (2017) Innovation for realizing a sustainable low carbon and high exergy efficiency society
- 5) L. Sun, M. Fujii, T. Tasaki, S. Ohnishi, Y. Dou, H. Dong, Y. Hijioka, T. Fujita: The 9th biennial conference of the International Society for Industrial Ecology (ISIE), Chicago (2017) Assessment of urban symbiosis effect on urban metabolism based on energy flows analysis and life cycle assessment
- 6) Y. Dou, M. Fujii, H. Tanikawa, K. Okuoka, T. Fujita, T. Togawa: 3rd Annual IIES Science and Policy Workshop and GlobalTech International Conference on Low-Carbon Development, Shanghai (2017) Deep Decarbonization in Urban Energy Supply through Urban Renewal Strategy and Symbiosis Design
- 7) M. Fujii: 3rd Annual IIES Science and Policy Workshop and GlobalTech International Conference on Low-Carbon Development, Shanghai (2017) Hybrid low-carbon industries and application of ICT
- 8) L. Sun, M. Fujii, T. Tasaki: 3rd Annual IIES Science and Policy Workshop and GlobalTech International Conference on Low-Carbon Development, Shanghai (2017) Achieving a low carbon city through urban symbiosis: A case of Tokyo Metropolis
- 9) Y. Dou, K. Okuoka, M. Fujii, H. Tanikawa, T. Fujita, T. Togawa: International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2017, Nagoya (2017) Diffusion of Low-carbon District Heating Systems Considering Urban Renewal Strategies: Case of Shinchi-Soma Region in Fukushima, Japan
- 10) L. Sun, M. Fujii, T. Tasaki, S. Ohnishi: International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2017, Nagoya (2017) The energy recovery rate and environmental gains of different Municipal Solid Waste (MSW) treatment technology options
- 11) 稲葉陸太、田崎智宏、河井紘輔、松橋啓介、西村 想、山口直久：第28回廃棄物資源循環学会研究発表会、東京（2017） 広域処理を考慮した廃棄物処理施設の稼働率と容量削減率の推計
- 12) 稲葉陸太：廃棄物資源循環学会 廃棄物計画部会 第4回研究会、東京（2017） 地域循環事業における中止事例－成功と失敗の実践知
- 13) 藤井実：廃棄物資源循環学会セミナー「AI 導入で資源循環・廃棄物処理に画期的変化始まる」、東京（2017） 資源循環・廃棄物処理とAI 導入の展望
- 14) 藤井実：エコテクノ2017、福岡（2017） 廃棄物・リサイクル分野へのIoT導入の可能性と産官学連携の活動
- 15) M. Fujii: 2017 Global Cities Forum, Shanghai (2017) Promotion of de-carbonized industry through efficient use of waste and renewable energy
- 16) Y. Dou, M. Fujii, K. Okuoka, H. Tanikawa, T. Fujita: 2017 Global Cities Forum, Shanghai (2017) Compact City Planning and Assessment Based on Building Stocks Renewal for District Heating Systems: A Case in Fukushima, Japan
- 17) 藤井実：北九州産業学術推進機構・エネルギーマネジメント研究会、福岡（2017） 響灘地区の低炭素型産業都市づくりに向けた取組み
- 18) 藤井実：資源素材学会資源リサイクリング部門委員会講演会、東京（2017） 資源循環分野におけるAI・IoT活用の展望
- 19) Y. Dou, H. Tanikawa, T. Fujita, M. Fujii, K. Okuoka: 2017 Graduate Student Forum on Sustainable Use of Natural Resources, Xiamen (2017) Integrated planning and assessment for low-carbon eco-city development through strategic urban renewal and energy symbiosis
- 20) 稲葉陸太、田崎智宏、河井紘輔、西村 想、山口直久：第13回日本LCA学会研究発表会、東京（2018）

生ごみと下水汚泥の集約処理による環境面および経済面での効果

- 21) 牧誠也、大西悟、藤井実、Dou Yi：第13回日本LCA学会研究発表会、東京（2018） 地域特性を考慮したエネルギー回収率・純費用による地域廃棄物処理システム提案枠組みの開発
- 22) 藤井実：日本産業機械工業会第9回3Rリサイクルセミナー、東京（2018） リサイクル分野でのIoT、AI 導入の展望
- 23) Y. Dou, M. Fujii, S. Ohnishi, T. Fujita, H. Tanikawa: 2018 Institute of Innovation and Circular Economy Conference, Taichung (2018) Enhanced Waste Heat Utilization through Symbiotic District Energy Systems Considering Long-term Urban Renewal: Cases in Japan
- 24) Y. Dou, H. Tanikawa, M. Fujii, K. Okuoka, T. Fujita, The International Society for Industrial Ecology 6th Asia-Pacific Conference (2018) Strategic Built Environment Management Toward Stock-based Low Energy Cities: Case of Kitakyushu, Japan.
- 25) Y. Dou, M. Fujii, K. Okuoka, H. Tanikawa, T. Fujita, S. Maki, The 13th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES) (2018) Strategic Urban Renewal for Long-term Energy Saving in Cities: Case of Kitakyushu, Japan.
- 26) 藤井実、第9回 3Rリサイクルセミナー—リサイクル産業のイノベーションに向けて（2018） リサイクル分野でのIoT、AI 導入の展望
- 27) 藤井実、平成30年度 LSA環境講演会（SDGsと廃棄物処理・最終処分場）（2018） 廃棄物処理・リサイクルとSDGs・IoT.
- 28) 藤井実、SUN LU、 林希一郎、 大場真、第13回日本LCA学会研究発表会（2018） 資源循環と気候変動などの統合的な評価に関する研究
- 29) M. Fujii, S. Ohnishi, K. Inaba, L. Sun, Y. Dou, S. Maki, The International Society for Industrial Ecology 6th Asia-Pacific Conference, (2018) Toward de-carbonized industry through efficient use of waste and renewable energy.
- 30) L. Sun, M. Fujii, T. Tasaki, T. Fujita, 2018 Global Cities Forum (2018) Circular Economy in Tokyo Metropolis and its Indication on Climate Change Mitigation and Environmental Benefit.
- 31) N. Goto, S. Ohnishi, M. Fujii, The 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management 2019) Study of location of Solid Waste Incineration Plant with New Energy Recover Facilities in Japan.
- 32) M. Fujii, S. Ohnishi, Y. Dou, L. Sun, and L. Dong, the 10th International Conference of the International Society for Industrial Ecology (2019), Industrial Smart Energy Sharing for promoting de-carbonized industrial park.
- 33) 牧誠也、大西悟、 藤井実、後藤尚弘、第38回エネルギー・資源学会研究発表会（2019） 産業熱需要量の空間分布推計法の開発及び清掃工場からの熱供給可能性の検討：愛知県におけるケーススタディ
- 34) L. Sun, M. Fujii, T. Fujita, 2019 International Conference on Resource Sustainability - Cities (2019) Circular economy practices of Tokyo Metropolis and its energy saving & environmental benefit effect.
- 35) M. Fujii, T. Okadera, N. Goto, S. Ohnishi, S. Maki, L. Sun, The 14th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (2019) Possibility to Building Smart Energy Sharing Network in an Industrial Park Through the Information Sharing.
- 36) L. Sun, M. Fujii, S. Maki, S. Ohnishi, Y. Dou, The 14th Conference on Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems (2019) Energy saving and environmental benefit of waste-to-energy transition in China.
- 37) 稲葉陸太、田崎智宏、河井紘輔、不破敦、高木重定、第30回廃棄物資源循環学会研究発表会（2019）

一般廃棄物フロー全国モデルを用いた市町村別対策効果の推計

- 38) R. Inaba, T. Tasaki, K. Kawai, A. Fuwa, S. Takagi, 5th International Conference on Final Sinks (2019) NATIONAL EFFECTS OF INTEGRATED WASTE MANAGEMENT MEASURES BY MUNICIPALITIES IN JAPAN.
- 39) N. Goto, S. Ohnishi, and M. Fujii, the 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management (2019) Study on Location of Solid Waste Incineration Plant with New Energy Recover Facility in Japan
- 40) 藤井実、2019年度 第4回地球環境技術推進懇談会 循環・代謝型社会システム研究会 (2020) 廃棄物焼却熱利用の高度化と資源循環分野でのIoT活用の可能性
- 41) S. Maki, S. Ohnishi, M. Fujii, N. Goto, L. Sun, 1st Asia Pacific Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment system, (2020) Evaluation of Spatio-Industrial Steam demand by Spatial Production Shipment Value Estimation and Availability analysis of Steam supply from Waste Treatment Plant.

<ポスター発表>

- 1) 藤井実、SATテクノロジー・ショーケース2018 (2018) 廃棄物処理・リサイクル分野へのIoT導入の可能性と産官学連携の活動

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 藤井実、エコテクノ2018 資源循環業界でのIoT・AI導入促進セミナー ～環境イノベーションによる資源循環業界の高度化実現に向けて (2018) 廃棄物処理・リサイクルIoT導入促進協議会における取り組み
- 2) 藤井実、令和元年度第1回シンポジウム「地域循環共生圏形成における廃棄物エネルギー利用施設の果たす役割と可能性」(2020) 廃棄物の熱エネルギー利用の高度化の可能性。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

<Outstanding Presentation Award>

Y. Dou, K. Okuoka, M. Fujii, H. Tanikawa, T. Fujita, T. Togawa: International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2017, Nagoya (2017) Diffusion of Low-carbon District Heating Systems Considering Urban Renewal Strategies: Case of Shinchi-Soma Region in Fukushima, Japan

8. 引用文献

- 1) 環境省環境再生・資源循環局廃棄物適正処理推進課：高効率ごみ発電施設整備マニュアル (2018)
- 2) 小川紀一郎，蓮池宏，新藤紀一，谷内田淳一，大内優，谷川博昭，中村昭史，谷口直彦：再生可能エネルギー利用火力発電システム，RPF利用火力発電システム実用化FS，火力原子力発電，Vol. 67, No. 1, pp. 33-44 (2016)
- 3) 資源エネルギー庁：再生可能エネルギーの主力電源化に向けた今後の論点～第5次エネルギー基本計画の策定を受けて～ (2018)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/007_01_00.pdf

- 4) 丸尾寿宏：アブダビ首長国・スワイハン太陽光発電事業の紹介，外務省国際協力局気候変動課・気候変動に関する有識者会合（2018）
<https://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000329366.pdf>

II-2 廃棄物の高度な地域熱利用を推進するための社会インフラ・制度

東京理科大学

理工学部 経営工学科

大西 悟

伊藤 真理、鈴木 正昭

平成29～令和元年度研究経費（累計額）：11,563千円（研究経費は間接経費を含む）

（平成29年度：3,968千円、平成30年度：3,627千円、令和元年度：3,968千円）

【要旨】

サブテーマ1で示された2つの高度な地域熱利用システムを推進するための社会インフラと制度を研究した。焼却炉から回収した高温蒸気を製造業の工場で直接利用するシステムは、韓国のベストプラクティス分析をもとに、北九州市におけるビジネスモデルの分析、検討を実施し、社会実装に関連する要件を特定した。費用便益分析では、ステークホルダーごとの費用・便益・リスクの配分を検討する枠組みを策定した。そして、地域EIPセンターの創設に向けた検討を開始することで社会実装支援策を研究した。一方で、民生での低温排熱利用については、焼却炉が複数存在し、多様なエネルギー需要と再生可能エネルギーが存在する東京の中央区と江東区を対象に住宅・業務系の地域エネルギーシステムのモデルを構築した。また、こうした社会実装の水平展開策を検討するため、技術・経済データ、地域特性データベースを構築した。サブテーマ3の収集運搬モデル、立地特性分析の基盤となったほか、政策変数による影響を分析するモデル群を構築に活用した。このモデル群により、廃棄物の分別、収集・運搬、処理技術、エネルギー回収のオプションが操作的に扱えるため、シナリオに応じたシミュレーションを実施する基盤が整備できた。その中で、焼却熱の産業利用という高度なエネルギー回収システムは、地理的条件がそろえば、高効率発電といった他の技術オプションと比較しても十分な純費用便益効果が見込めることが明らかとなった。これらの研究結果をもとに、社会システムと制度の在り方およびステークホルダーごとの役割を明示し、産業共生、Waste to Energy、地域熱供給研究に学術的な貢献を果たすとともに、社会実装に向けた論点を明らかにした。

本年度は、査読付き学术论文2編（うち、1編は責任著者）、国内解説記事（1編）、国際学会発表（6件）、国内学会発表（2件）、外部講演（3件）を行い、研究成果を対外的に発信してきた。また、北九州市において「産業スマートエネルギーシェアリング研究会」の委員として、本研究課題の成果及び知見を社会実装に向けて活用した。

【キーワード】

地域熱利用ビジネスモデル、社会実装支援、費用便益分析、実態分析、政策影響シミュレーション

1. はじめに

本研究課題で検討する高度な地域熱利用は、サブテーマ1での検討の通り、有効性が確認されている。国内では社会実装が進んでいない現状がある一方で、韓国やデンマークのベストプラクティスが存在する。その状況を打開するために、国内において高度な地域熱利用を社会実装し、全国に普及させる上での阻害要因を特定し、それを緩和する社会インフラ・制度を研究することは、重要な課題である。

2. 研究開発目的

廃棄物からの高度な地域熱利用を促す社会インフラ・制度を研究することを目的とする。低温温熱を供給する第4世代地域熱供給を含めて、国内および海外の事例調査に基づき、阻害要因と緩和策を抽出する。また、自治体向けインターフェースを作成して清掃工場の実態調査を行い、地域特性データベースを構築して、高度な地域熱利用システムの特定地域での費用便益分析を実施し、社会実装を支援する検討を行う。加えて、自治体の政策影響シミュレーションを実施し、廃棄物政策、エネルギー政策、都市政策を統合的に分析する枠組みを提示する。そして、高度な地域熱利用を実現のために必要な社会インフラ・制度を明らかにし、ステークホルダーごとの役割を明示的に論じる。

3. 研究開発方法

3.1 社会インフラ・制度の定義と検討に学術的な研究設計

廃棄物からの高度な熱利用は、国・自治体の定める制度のもとで、ステークホルダーが、ソフトな社会インフラとしての社会実装の支援枠組みを利用し、熱導管ネットワーク、熱交換器、蓄熱装置、自動制御装置などのハードな社会インフラを整備し、制度に則って運営することで推進することができるとの観点に立ち検討を進めた。ここで制度とは、国の定める法、政策に加え、地方自治体の策定する条例、計画、そして立地に大きな影響をもたらす住民協定を指す。

これら社会インフラ・制度による高度な地域熱利用を推進、展開を検討するために、産業エコロジー分野の学術的な知見を活用した。特に、特定地域を対象とした産業共生(industrial symbiosis)および地域熱供給(District heating & cooling)の研究蓄積を基盤とする。ここでは、熱利用にかかわる主体を明確にし、それぞれの立場からの阻害要因とその緩和策を検討するための論点を抽出し、分析の枠組みを提示した。

産業エコロジー研究、特に産業共生研究の文献調査を基に、本サブテーマで取り扱う、廃棄物からの高度な地域熱利用を定義し、分析した。もともとの産業共生の基本戦略は、産業団地内における素材産業や加工産業などの企業群が、その地理的近接性による利点を活用することで、副産物や水、熱の交換などを通じて環境的、経済・社会的便益を得ようとするところにある¹⁾。この定義は、あくまで産業団地における複数の産業セクター間の交換に主眼が置かれており、都市セクターとの交換は除外されている。これに対し、都市共生(urban symbiosis)は、都市活動から排出される廃棄物を産業で原燃料として利用することでさらなる環境的、経済・社会的便益を得ようとするところにある²⁾。だが、近年の研究では、産業団地で発生した排熱の都市での利用、都市活動から排出された廃棄物の焼却熱の産業での利用および都市での利用も対象に含まれ、図3.2.1のように産業セクターと都市セクターおよびその結節点としての廃棄物処理・熱管理セクターの関係性を整理することでより包括的な分析が可能になる。具体的には、一般廃棄物および産業廃棄物の焼却炉からの回収熱を、熱管理セクターを通じて、あるいは直接の民生利用または産業利用を想定する。ただし、本サブテーマでは、一般廃棄物の清掃工場を主眼とし、産業廃棄物処理場は定性的な分析にとどめている。

また、焼却熱の産業利用は、蔚山市において事例が報告されているが、焼却炉を産業団地内に立地する熱供給工場としてとらえており、都市セクターとのつながり、つまり廃棄物管理の視点を明示的に扱っていない。焼却熱または産業排熱の民生利用は、地域熱供給システム(district heating & cooling system)の文脈で研究が進展しており、欧州を中心に第4世代地域熱供給³⁾やセクターカップリング⁴⁾が主たるテーマとなっている。本研究課題では、廃棄物政策と産業共生、地域熱供給システムを

包括的に扱っている点、さらにマクロなエネルギー政策の影響も検討している点で、学術的な意義が高い。なお、産業廃棄物処理の清掃工場を含む点線部分の検討は、今後の課題であり、継続的に研究を進める予定である。

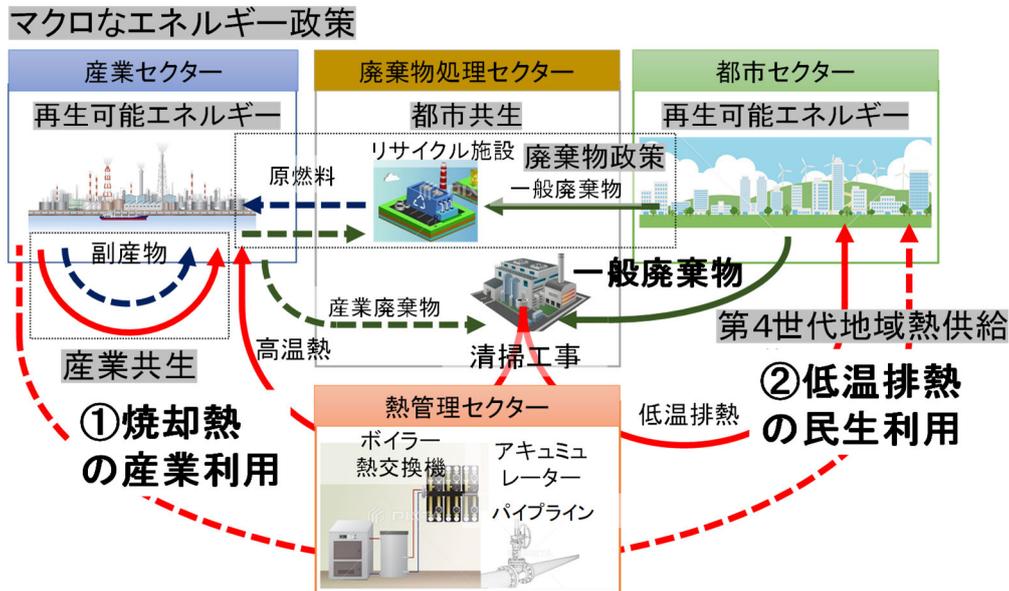


図3.2.1 学際的な研究領域における高度な地域熱利用の位置づけ

この際、高度な地域熱利用システムは、事業性が求められる産業利用と公共性の高い民生利用では、事業化の前提条件が大きく異なり、同時に議論することは難しい。焼却熱の産業利用は、より収益性に着目したビジネスモデル分析が有効である。産業利用については、すでに市場経済の中で取引されている副産物利用、適切な分別などリサイクルシステムを前提とする原燃料利用に関する研究は多くなされている⁵⁾。配管敷設などが必要となる熱利用は、初期建設費が比較的高額になることも考慮し、円滑なビジネスモデルの構築に向けた研究が必要になる。一方で、民生での低温排熱利用は、地域熱供給の文脈ですでに多くの研究成果が報告されている⁶⁾。本サブテーマは、産業共生、廃棄物からのエネルギー回収、地域熱供給の知見と実践を活用して研究を設計した。

具体的には、第一に、国内の実態調査および国際的なベストプラクティスを調査し、廃棄物からの高度な地域熱利用の阻害要因とその緩和策を抽出した。第二に、主たるステークホルダーとなる一般廃棄物の清掃工場の実態調査を実施するとともに、長期シナリオシミュレーションおよびサブテーマ3での立地分析のための地域特性データベースを構築した。ここでは、焼却炉を保有する自治体あるいは一部事務組合（以下、自治体と表記）に対して、産業への地域熱供給に関する情報を発信してその有効性の周知を図るとともに、選好等を調査するインターフェースを設計・開発し、全清掃工場にアンケート調査を実施した。さらに、関連するデータを整備し、地理情報システム（GIS）上のデータベースを構築した。第三に、焼却熱の産業利用について、先行して検討が進んでいる北九州市において費用便益分析と社会実装支援を実施した。そして、低温排熱の民生利用では、地域エネルギーシステムモデルを構築し、東京都中央区、江東区でのケーススタディを実施した。社会実装支援では、岩手県紫波町の事例調査をもとに支援ツールを開発した。第四に、広域化計画など廃棄物政策との関連を検討するため、愛知県を対象に政策影響シミュレーションを実施した。ここでは、地域特性に応じた自治体あるいは一部事務組合の意思決定を、OR (operations research) の分野で学術的基盤があるスケジューリング問題としてモデル化し、他の技術オプションとの定量的な比較分析を可能にした。

これにより、廃棄物からの高度な地域熱利用策法を提示するとともに、実現のために必要な社会インフラ・制度を明らかにし、ステークホルダーごとの役割を明示的に論じる。

3.2 事例調査に基づく廃棄物からの高度な地域熱利用の阻害要因とその緩和策の抽出

3.1の枠組みを用いて、廃棄物焼却熱の産業・民生での高度利用について焼却施設、熱供給事業の技術・経済データ、法制度、ビジネスモデルの観点から事例調査を実施した。同時に、国内でのステークホルダーへのインタビュー等を通じて、高度な地域熱利用の阻害要因とその緩和策を抽出した。それらに加え、国際的なベストプラクティスの事例調査を実施した。表3.2.1にそれぞれの調査方法を示す。産業利用及び民生利用のそれぞれで実態調査、ベストプラクティス調査を実施した。また、主たるステークホルダーである清掃工場については、網羅的な調査が可能な一般廃棄物処理場を対象に実証データによる分析を実施している。詳細は、3.3に記載している。

まず、国内での社会実装、普及を阻害している現状を調査した。焼却炉から工場への蒸気供給事業については、ステークホルダーへのエキスパートインタビューおよび議論を通じて明らかにした。表3.2.2に環境総合研究推進費「都市廃棄物からの最も費用対効果の高い資源・エネルギー回収に関する研究(3K143016)」および本研究課題で実施した2016年4月～2020年3月までのインタビュー調査実施状況を示す。インタビュー項目は、熱利用事業者へは、熱利用の現状と燃料の種類、熱利用プロセス、外部からの熱供給事例の有無、外部からの熱供給を受け入れる際の制約条件と課題および自由議論である。特定の事業を想定した場合と業界団体など潜在的なステークホルダーへのインタビュー結果を一次情報とし、関連する文献資料として学術論文および報告書を二次情報とし、分析した。民生への地域熱供給事業については、すでに地域熱供給事業として事業化している事例を対象に実態調査を実施した。具体的には、地域熱供給法に基づく事業についての報告資料⁷⁾を分析するとともに、特徴的な地域熱供給事業である東京都江東区の東京臨海副都心の地域熱供給事業、岩手県紫波町の地域熱供給事業の現地調査、ビジネスモデル調査を実施した。

続いて、ベストプラクティスとして国際的に評価されている事例を調査した。産業での熱利用については、韓国のエコ・インダストリアル・パーク事業を対象に調査を行った。韓国では、2005年より国家エコ・インダストリアル・パーク計画(以下、EIP計画)を推進し、認定された都市ごとに工場間の熱/副産物の交換プロジェクト18(以下、EIP事業)を戦略的に推し進めた結果、焼却炉を含む熱供給可能な工場から熱需要のある工場に蒸気を送る事業が社会実装され、普及が進んでいる^{8)、9)}。具体的なEIP事業として、蔚山市の一般廃棄物処理焼却炉と化学工場のEIP事業の事業推進過程を重点的に調査した。調査にあたっては、既報の二次情報を調査したうえで、プロジェクトを中心的に推進してきた蔚山大学のHung-Suck PARK教授へのエキスパートインタビュー、現地調査を通じた関連団体との意見交換による一次情報をもとに社会実装の支援の具体策を明らかにした。

第二に、低温排熱の民生利用では、第4世代地域熱供給事業を打ち出し、先行しているデンマークを対象に、社会インフラと制度の特徴と動向調査を実施した。デンマークは、オイルショック以降のエネルギー転換についての国民内の政治的コンセンサス¹⁰⁾のもと、国が主導的に制度設計を実施し、その中で階層的に地域熱供給事業を推進している。同時に風力発電が主力電源であることもあり、熱電セクターをカップリングしたスマートエネルギーシステムへの移行を見据えた廃棄物からの高度熱利用を実現しつつある。制度による事業化の保証が社会実装を促し、官民ともに知見と経験を蓄積していく仕組みは、国内の高度な熱利用を進めるにあたっても有意義な情報となる。焼却熱の低温排熱利用事業の推進・普及策に関する調査は、主に既報の二次情報であるが、「第4世代地域熱供給フォーラム(事務局:認定NPO法人環境エネルギー政策研究所、座長:東北大学大学院 工学研究科 技術社会システム専攻 中田俊彦教授)」と連携することでより実践的な知見を入手してきた。

表3.2.1 実態・ベストプラクティス調査の概要

	産業での熱利用事業	民生の地域熱供給事業
国内実態調査	<ul style="list-style-type: none"> ● ステークホルダーインタビュー ● 国内事例調査（川崎スチームネット、茨城県鹿嶋地区蒸気供給事業） 	<ul style="list-style-type: none"> ● 地域熱供給事業の実施報告書分析 ● 国内事例調査（東京臨海副都心熱供給事業、岩手県紫波町地域エネルギー事業）
ベストプラクティス調査	<ul style="list-style-type: none"> ● 韓国エコ・インダストリアル・パーク事業 ✓ 調査対象：蔚山（ウルサン）市 ✓ 調査協力：蔚山大学、地域EIPセンター ✓ 調査方法：エキスパートインタビュー、現地調査、ワークショップ、二次情報調査 	<ul style="list-style-type: none"> ● デンマークのエネルギー政策 ✓ 調査対象：CHP型焼却炉 ✓ 調査協力：第4世代地域熱供給フォーラム ✓ 調査方法：エキスパートインタビュー、二次情報調査
アンケートによる実態調査	3.3にて、一般廃棄物の清掃工場の実態調査を実施（*産業廃棄物焼却炉事業者には、未実施）	

表3.2.2 ステークホルダーインタビュー調査の実施概要

	熱供給事業者	熱管理事業者/エネルギー情報事業者/プラントメーカー	熱利用事業者
潜在的なステークホルダー	全国都市清掃会議 （2018年2月27日、2019年10月21日、2020年2月20日） 一廃清掃工場S1 （2016年1月14日） 一廃清掃工場S2 （2016年1月20日） 産廃清掃工場S3 （2017年11月14日） 一廃清掃工場S4 （2018年1月19日） 一廃清掃工場S5 （2018年1月22日） 火力発電所S6（2019年2月20日、2020年2月7日）	日本熱供給事業団 （2016年4月25日、2018年1月17日） M1社 （2016年9月26日） M2社 （2016年11月15日） M3社 （2016年11月25日） M4社 （2018年1月18日、2020年1月10日） M5社 （2020年2月27日）	日本製薬連合会 （2015年11月17日） 日本化学工業会 （2015年11月17日、2018年2月16日） 日本ゴム工業会 （2016年1月14日、2018年3月8日） D1社（2019年9月18日、2020年2月20日）
A市の産業団地におけるステークホルダー（なお、A市自治体とは、定期的に意見交換を実施している）	工場SA1 （2016年1月18日） 工場SA2 （2016年2月25日、2017年9月28日*、2020年3月9日）	MA1社 （2017年9月28日*） MA2社 （2018年2月23日）	工場DA1 （2016年1月18日、2017年9月28日*） 工場DA2 （2016年7月14日、2016年12月7日、2017年9月28日*） 工場DA3 （2016年7月28日、2016年12月7日、2017年9月28日*） 工場DA4 （2020年3月9日）
ベストプラクティス	蔚山大学Park教授		

一廃清掃工場S1；民生部門への地域熱供給を実施している清掃工場、一廃清掃工場S2；民生部門への地域熱供給を実施している清掃工場、産廃清掃工場S3；他工場への熱融通事業を検討している産廃事業者、一廃清掃工場S4；広域化計画に基づく統廃合で建設された清掃工場、一廃清掃工場S5；広域化計画に基づく統廃合で建設された清掃工場、工場SA1；LNG火力発電所、工場SA2；バイオマス石炭混焼発電所、M1社；他工場への熱融通事業を実施している発電事業者、M2社；ガス会社、M3社；発電事業者、M4社；焼却炉の設備メーカー、M5社；産業系ITベンダー、D1社；化学企業、工場DA1；建材製品製造工場、工場DA2；ゴム製品製造工場、工場DA3；石膏製品製造工場、工場DA4；産業廃棄物処理場、*ステークホルダー間での意見交換会を実施

3.3 一般廃棄物の清掃工場の実態調査と地域特性データベースの構築

廃棄物からの高度な地域熱利用を検討するにあたり、網羅的に調査が可能な自治体が保有する清掃工場の実態調査を実施した。これまでも清掃工場の熱利用実態に関する調査はなされてきているが、本サブテーマでの主眼となる社会システムと制度を検討するために、アンケート調査機能に加え、普及啓発（Awareness Rising）の機能を取り入れている。具体的には、図3.2.2に示すウェブサイト上のインターフェースを開発した。そこでは、自治体の選好等を調査するアンケート実施機能と、サブテーマ1で検討している産業での焼却熱の高度利用システムを導入した際の、費用対効果を簡易に算定して表示する機能、ベストプラクティスである蔚山市の事例の記載、関心のある自治体あるいは事務組合を特定する機能である。なお、費用対効果を表示する機能は、環境総合研究推進費「都市廃棄物からの最も費用対効果の高い資源・エネルギー回収に関する研究（3K143016）」で構築した長期シミュレーションツールを発展させ、設計したものである。

開発したインターフェースを用いて、2018年5月24日～7月2日にかけて、772の自治体の担当者に対し、各行政体および1,011の清掃工場に関する調査を実施した。質問項目は、清掃工場の管理者に対し、更新・改良時の優先順位、情報源、熱利用を含む計画、熱利用への選好、工業団地との隣接性、エネルギー回収の実態、更新・改良に関連する地域特性に関するもの、それぞれの清掃工場について、清掃工場の処理能力・方式、エネルギー回収の有無とその費用と便益、更新・改良の計画および関連する地域特性に関するものである。公益社団法人全国都市清掃会議の協力を得て、協力を周知し、372の自治体から、有効回答(372/772=48.2%)を得ることができ、447の清掃工場に対する有効回答(447/1011=43.7%)も得ることができた。また、計7自治体からの打ち合わせ希望があった。そして、そのうちの3自治体とやり取りをし、1自治体とは現地での意見交換および簡易試算を実施した。

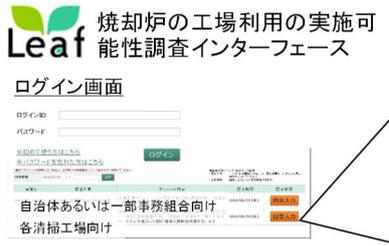
また、意見交換の調整で明らかになったのが、広域化計画含めて、計画策定のフェーズにより、受け入れ可能性が異なることにある。例えば、広域化を検討している場合、同じ広域化ブロックの中で一自治体のみが先行して新しい取り組みを検討することを回避する傾向がある。また、単独の更新であっても立地の選定前であれば意見交換の余地があるが、一度立地が決めると検討の幅が異なることとなる。今回、計画の進捗を設問しているので、普及にあたっては、県各段階との兼ね合いで社会実装の可能性のある自治体を抽出することが有効と考えられる。実際、今回のアンケートでは打ち合わせの希望がなかった自治体の中にも、単独での更新計画の事前調査段階の自治体から全国都市清掃会議を通じて、意見交換を求められており、潜在的な候補自治体はあるといえる。

あわせて、廃棄物からの高度な地域熱利用を検討するにあたり、上記で設計、開発した収集手法を活用して得たデータに加え、統計情報および地理情報システム（GIS）から自治体の地域特性データベースを構築した。そのデータ構造を図3.2.3に示す。廃棄物からの熱利用を検討するためには、都道府県での広域化ブロック、市区町村、一部事務組合、メッシュ、清掃工場、製造工場の立地ポイントといった異なる空間スケールの情報をGIS上に構築した。さらに熱利用の可能性のある産業需要施設の技術・経済データも格納することで、長期シミュレーションを実施する。なお、このデータベースは、インターフェースを利用することで得たデータ・既存の統計データと合わせて、サブテーマ1の技術モデルのデータを活用し、定量的な分析に用いる基盤とする。加えて、サブテーマ3で構築した修正Gridシティモデルと立地特性分析に活用されている。

3.4 特定地域での費用便益分析と社会実装支援

焼却熱の産業利用について、サブテーマ1でも記述されているように、福岡県北九州市・響灘地区において、費用便益分析と社会実装支援を実施した。具体的な熱供給ネットワークとエネルギーマネジメントの共有基盤のプロトタイプ事業を設計し、評価した。同地区では現在、すでに一部の工場間で相対の熱融通が行われているだけでなく、蒸気による熱供給ネットワーク構築のポテンシャルが十分にある。検討中のものも含め、同地区には多くの、また多種の熱需要/供給候補者が近接しているのに加え、本研究課題の代表者（藤井実）と本サブテーマリーダー（大西悟）は、工場管理者、自治体および公益団体、関連事業者などのステークホルダーとの交渉を通じ、信頼関係を醸成しつつある。その中

で、すでに、事業化に向けた産官学の協力体制が構築しており、公益財団法人北九州産業学術推進機構内に「産業スマートエネルギーシェアリング研究会」を立ち上げることに貢献し、二名とも委員を務めている。産業団地としての事業実施ポテンシャルを推計し、費用便益分析をし、社会実装を支援するに際して適したフィールドである。



Leaf 焼却炉の工場利用の実施可能性調査インターフェース

ログイン画面

ログインID:

パスワード:

ログイン

自治体あるいは一部事務組合向け
各清掃工場向け

実施日時；
2018年5月24日
～7月2日

実施対象；
772の自治体の担当者に対し、各自治体および1011の清掃工場について

①自治体あるいは一部事務組合向けアンケート

問2： 貴自治体または一部事務組合での清掃工場の更新あるいは改良に関するお考えについてお答えください。

問2-1： 貴自治体または一部事務組合の施設の更新あるいは改良計画を検討する際に優先している項目を、以下の候補から優先順位の高い順に3つお答えください。優先順位が低い項目でも、将来を想定して記載してください。

優先順位1:

優先順位2:

優先順位3:

③清掃工場ごとのアンケート

1. 焼却炉の更新をお考えください

1.1 焼却炉の更新の時期

1.2 焼却炉の更新の理由

1.3 焼却炉の更新の費用

1.4 焼却炉の更新の計画

②事例の紹介

事例：韓国・蔚山（ウルサン）市
焼却熱の産業利用「エコインダストリアルパーク事業」

1 蔚山（ウルサン）市の取り組み

韓国の蔚山（ウルサン）市にあるSungam第一・第二清掃工場では、清掃工場の焼却熱を回収し、近隣の化学工場に中圧・高圧熱を供給している。同事業は、韓国政府が2005年から実施している国家エコインダストリアルパーク事業（以下、EIP事業）の一環として、自治体と産業界が協働しながら実現した。清掃工場からの高圧エネルギー回収のベストプラクティスの一例である。

清掃工場は、自治体である蔚山広域区が管轄し、200トン/日が2基、250トン/日が1基の計3基の連続式トローカー炉を有し、下水汚泥焼却施設、農作物焼却施設も併設している。第一・第二清掃工場は、2009年6月に

④簡易な費用便益の推計値の提示

貴自治体がこのシステムを導入したら？

社会全体での利益	建設費にかかる初期コスト
年間 10 百万円	30 百万円

投資回収年

このシステムは、5 年で投資回収を回収できます。

図 3.2.2 ウェブサイトを利用したインターフェースの概要

図3.2.3 地域特性データベースのデータ構造（愛知県の実装例）

一方、低温排熱の民生利用については、総費用便益が最小となる地域エネルギーシステムを計算するモデルを構築し、熱需要パターンが多様であり、焼却廃熱以外の再生可能エネルギーの導入可能性が高い東京都中央区、江東区を対象にケーススタディを実施した。これは、デンマークでのベストプラクティス調査で論じたように、地域エネルギーシステムの中で、焼却熱利用を位置付けることが重要であり、その計画策定支援のためのツールを開発することを目的とするためである。本モデルの結果をもって社会実装を支援するには至っていないが、将来的に技術変数とモデルをオープンにすることで普及に貢献することが期待できる。また、中小規模の自治体に対しては、30～40年という長期間の投資回収を見越した実施体制を構築することが重要であることから、岩手県紫波町の取り組みを重点的に調査し、

49

その結果を実務者に利用できるように冊子を作製した。

1) 北九州市における地域熱利用の費用便益分析

対象地区の熱供給候補施設、熱需要候補施設の概要および熱供給可能量、需要量の推計値を表3.2.3、表3.2.4に示す。同地区は、北九州市地域エネルギー拠点化推進事業によってバイオマス混焼石炭発電所が2か所開発された。それぞれ112MWの出力で、バイオマス混焼比率は、熱量比で30%である。清掃工場ではないが、より高温域でのタービン利用から200℃前後の温度帯の抽気熱を利用することを想定しており、サブテーマ1で検討した技術システムと同等の経済性分析を実施することが可能である。また、本研究課題の開始時は、設計・建設段階であったが、1か所の事業所は周辺工場への熱販売を念頭に設計しており、2020年現在、すでに事業化している。もう一つの事業所は、インタビューを実施した、2018時は熱利用を行う余裕がなさそうであったが、バイオマス混焼であっても石炭火力発電所への社会的圧力が高まりつつある情勢から、関心を持つ可能性があると考えられる。さらに、同地区に産業廃棄物処理場が立地していたこともあり、今後、誘致することも十分に可能性がある。このほかに、すでに同地区で稼働しているコークス製造工場も乾式消化設備（CDQ）から熱供給可能であるほか、バイオマス専焼発電所の建設計画もある。

一方で、熱需要のある工場も複数立地している。D1、D2は、現状の設備で受け入れ可能な量と設備投資した受け入れ可能な量の2段階ある。それぞれの工場には、現地・インタビュー調査を実施し、製造工程、エネルギー供給設備、熱需要量と時間変動、事業への参加意向について複数回、意見交換している。同地区の熱供給可能量と比較して、十分な需要がある。

表3.2.3 対象地区の熱需要量

ID	蒸気使用量(t/h)	蒸気圧力(MPa)	供給熱量(MJ/h)	ドレン回収
D1	15	2.3	42,014	供給量の30～40%
D2	7.0	1.5	19,633	返送なし
D2'	19	1.5	53,029	
D3	32	2.0	89,548	
D3'	80	2.0	223,870	

表3.2.4 対象地区の熱供給可能量

ID.	蒸気供給量(t/h)	蒸気条件	供給熱量(MJ/h)
S1	10	1.68MPa * 220℃	28,404
S1'	50	1.68MPa * 220℃	142,018
S2	10	1.68MPa * 220℃	28,404
S2'	50	1.68MPa * 220℃	142,018
S3	7	1.8MPa*210℃	19,633
S4			不足分を補充
S5			160,603
S6			119,978

以上の熱供給の状況分析をもとに最終的なネットワークを設計した。ただし、費用便益分析をするにあたり、段階的な熱供給ネットワーク整備シナリオを想定した。第一に、すでに事業化が進んでいる2工場間の熱融通（ケース1）、第二に、蒸気ボイラー更新を想定し、近接する工場間で熱融通（ケース2）、第三に、ボイラー以外の熱交換器の更新を想定し、地区内で熱利用ネットワークを構築する（ケース3）ことを想定している。

ここで、比較となる基準システムおよび検討対象となる熱供給システムを定義する。基準システムは熱供給工場で蒸気を製造し、蒸気タービンで発電する発電所と、熱需要工場が燃料（石炭、LNG、バイオマス等）でボイラーから蒸気を製造し、オンサイトで熱利用する熱利用施設からなる。検討する熱供給ネットワークシステムでは発電所において、蒸気タービンから、熱利用施設の合計熱需要に合わ

せ、蒸気を抽気し、熱供給を行う。蒸気タービンでは発電のみを行う場合、70%以上の蒸気熱量は復水器で大気に解放され利用できない。また、蒸気タービンへの投入蒸気はLNG大規模火力発電所で無い限り、300℃程度であり、この場合の発電効率は25%程度で一般的に、系統電力の平均よりも低い。したがって、周囲に熱需要がある場合は、背圧タービンにより熱として利用した方が発電量は減るが、トータルの一次エネルギー効率は高いし、熱需要に限りがある場合も、蒸気タービンから一部抽気（抽気復水タービン）として利用した方が同様にトータルの一次エネルギー効率は高い。この際、熱供給によって減少した発電量も勘案し、便益の減少として取り扱う。なお、ネットワーク化による統一の蒸気供給条件として、現状の蒸気供給条件の中で一番低い圧力であるS3工場の1.8MPaとし、蒸気温度は若干、過熱した蒸気として210℃とする。各需要工場では必要に応じて減温減圧して使用することとする。

以上の想定の下、熱の需要量と供給可能量から各ケースの熱バランスを設定した。その結果を表3.2.5に示す。熱量合計の欄で、「需要先」は熱利用先における実際の利用可能な熱量を示す。これは熱供給施設出口の熱量に熱損出10%を見込んだ熱量である。図3.2.4に各々の配管ネットワーク図を示す。ネットワークの実現に向けた費用便益を明らかにするため、サブテーマ1で検討した技術システムおよび経済データを用いて、推計した。ビジネスモデルに関する事業性評価指標として、光熱費削減額(千円/年)、経費(千円/年)、単年度収支(千円/年)、建設費積算額(千円)、単純投資回収年数(年)を算定した。

表3.2.5 ケース4（地区全体ネットワーク化）の熱バランス

需給	工場	熱量(MJ/h)	熱量合計(MJ/h)	蒸気量(t/h)	備考
需要	D1	42,000	321,300	15.0	
	D2	53,000		18.9	
	D3	223,900		79.8	
供給	S1	28,400	需要先 321,300		
	S2	28,400			
	S3	19,600			
	S4	0			バックアップ用熱源
	S5	160,600			バランスする熱量を供給
	S6	120,000			

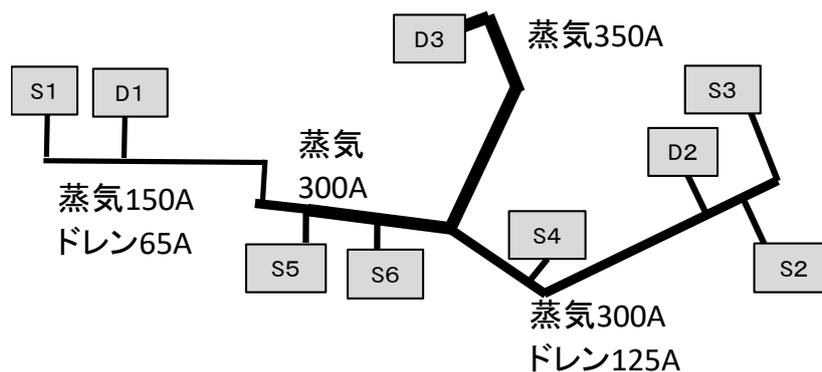


図3.2.4 同地区の熱利用ネットワークの配管設計

2) 産業利用に向けた社会実装支援の検討

焼却熱の産業利用について、社会実装支援に向けて活動を展開してきた。2)の費用便益分析は、研究者と北九州市が連携し、対象地区の工場へのインタビュー調査を刊行実施することにより、データの入手及び意見交換による推計結果の妥当性の確認と社会実装に向けた能力醸成（Capacity Building）を遂行してきた。そのほか、韓国の実態調査を十分に調査し、キーパーソンとの連携を通じて、高度な地域熱供給を推進するための中間組織の重要性を提起してきた。そうした活動を通じて、2018年12月よ

り前述の「産業スマートエネルギーシェアリング研究会」の立ち上げにつながり、委員として参画してきた。本研究会は、これまでの調査を通じて明らかとなった阻害要因と緩和策を共有したうえで、社会実装、さらには国内外への普及を目指している。2018年度は、ベストプラクティスである韓国・蔚山市でのEIPプロジェクトの実態調査を目的とし、同プロジェクトに関連する行政担当者、学術研究者、民間事業者などとの議論を実施し、実際にEIPプロジェクトを実施している同市の産業団地での視察調査を実施した。また、神奈川県川崎市で熱（蒸気）供給事業を行っている川崎スチームネットの実態調査を目的とし、蒸気の供給元である東京電力川崎火力発電所の見学、及び同事業担当者との議論を実施した。このように、2018年度をかけた、社会実装に向けた知見を深めるとともに、ステークホルダー間での信頼醸成を進めてきた。

2019年度は、モデル事業となりうるエネルギー、特に蒸気ネットワークを具体化することを目標に、候補企業へのアプローチやそれに向けたビジネスプラン作成の準備を進めた。またそれと並行して、想定していた社会実装支援組織である「北九州版 EIP センター（仮）」の立ち上げにむけて、主体候補の選定やその事業内容などの検討も実施してきた。更に、将来的に情報管理事業者によるデータシェアリング事業の要素を取り入れるためにも、現在同様の目標に向けて検討を行っている韓国蔚山市とも引き続き連携しながら、その事業内容や技術基盤の検討を続けた。ここでの検討を受けて、特定地域における社会実装支援組織の要件を明確にし、その在り方を考察する。同時に、情報技術の活用も論点としており、研究代表者（藤井実）が代表を務める「廃棄物処理リサイクルIoT導入促進協議会」、廃棄物資源循環学会「情報技術活用研究部会」、産業系ITベンダーのビジネスモデル調査等を通じて、長期的な事業性向上策を議論してきた。地域EIPセンターにおける情報技術の果たす役割も考察する。

3) 江東区、中央区における地域エネルギーの費用便益分析

低温排熱の民生利用については、東京都江東区、中央区を対象に地域エネルギーシステムモデルを構築した^{11, 12)}。これは、デンマークのベストプラクティス分析から、清掃工場の熱利用は、他の再生可能エネルギーや既存の系統電力等と統合的に検討することが有効であることを鑑み、まずは多様な熱需要が存在する都心部においてプロトタイプを構築することを目指した。

まず、細分化した地区の時間別、季節別、需要家種類別のエネルギー需要量を推計する。中央区、江東区を町丁目毎にそれぞれ98地域と151地域に分類する。エネルギー需要量は2015年における再開発予定も含めたビル単位での建物ポイントデータ¹³⁾の延べ床面積と時間単位の建物用途別エネルギー需要原単位データを乗じ推計する。需要家は戸建住宅(dh)、集合住宅(ad)、オフィス(of)、商業(co)、病院(hos)、スポーツ施設(sp)、ホテル(hot)の計7つを抽出し、用途別需要は電気、冷房、暖房、給湯に内訳される。

エネルギー需要を満たすため、太陽光発電、個別コジェネレーションシステム、地域エネルギー供給システム、焼却炉からの廃熱、下水処理場、風力発電の導入量および運転状況を変数とした総費用最小化モデルを線形計画法にてモデル化する。各需要家のエネルギーフローを図3.2.5に示す。モデルは、式(1)に示す総費用最小化を目的関数としたものである。このモデルでは、地区間の熱輸送を扱えるモデルになっている。

$$\text{minimize } T_OBJ = T_Cost = \text{Consum_Cost} + \text{DHC_Cost} \quad \text{式(1)}$$

T_OBJ : 目的変数

T_Cost : 総費用

Consum_Cost : 各需要家の費用

DHC_Cost : DHC の総費用

なお、Cnsm_Cost 及びDHC_Costはエネルギー機器の固定費、燃料費、輸送費で構成される。

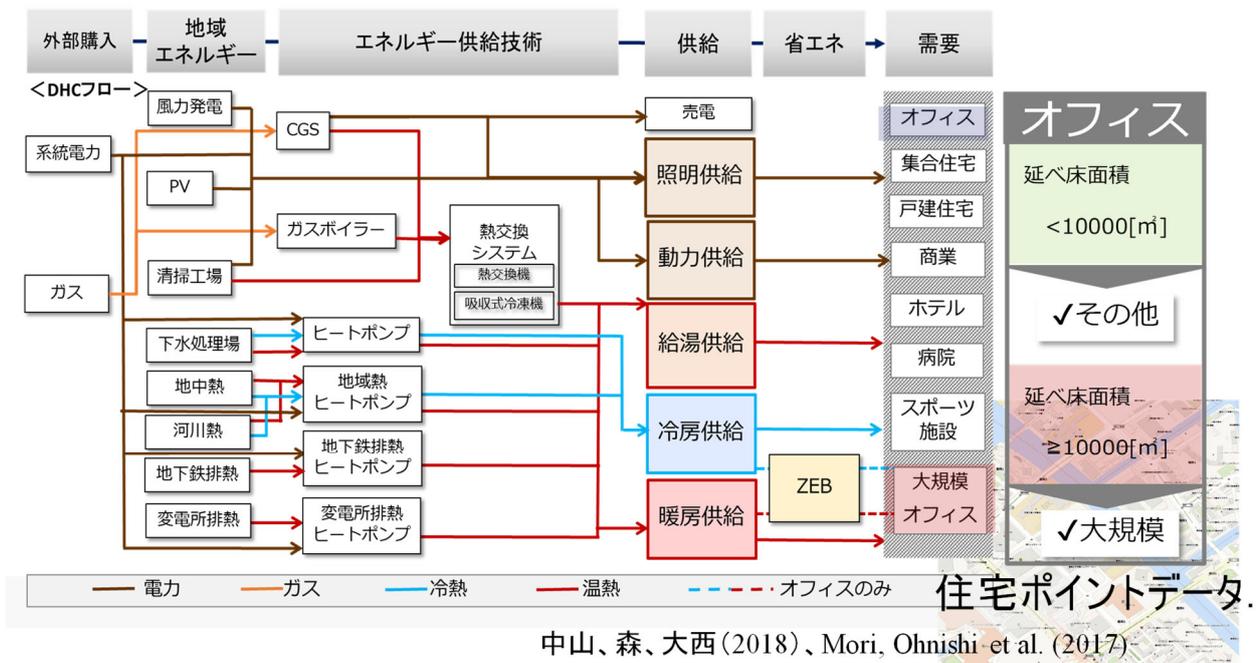


図3.2.5 地域エネルギーモデルのシステム構成

本モデルにおいて需要家別エネルギーシミュレーションを実施し、期間1年間で、ベースラインシナリオと地域エネルギーシステム導入のシナリオについて分析した。ここでは、特に、清掃工場からの低温排熱と他の未利用エネルギーとの比較を行った。

- ✓ Case-basic : エネルギー機器の導入なし
- ✓ Case-district_HC : PV、CGS、DHC、DHCを介した地域間および電気事業者への売電あり、風力発電、未利用エネルギー（清掃工場、下水処理場、地中熱、河川熱利用、地下鉄排熱）

4) 低温排熱の民生利用の社会実装に向けた検討

低温排熱の民生利用について、社会実装支援に向けた具体的な事業実施支援にはいたらなかった。しかし、岩手県・紫波町のベストプラクティス調査を足掛かりに、公共性を高めながらエネルギー回収効率を高める方策を検討してきた。詳細は研究結果にて後述するが、低温排熱の民生利用は、事業性が低く、単体の事業であっても補助金がなければ経済的に成立しないことが多い。そのような中、事業計画そのものの採算性に加えて、デザインやコミュニティ機能などの公共的な価値を高めることが重要になる。また、事業運営の主体が共創的に参画することで、他の事業との連携などの発展が可能になる。デンマークのAmoager焼却炉、岩手県紫波市の地域エネルギー事業、東京都武蔵野市のベストプラクティスからの知見も踏まえ、今後、低温排熱の民生利用を通じた公共性の向上を促す社会実装支援に向けた要因を抽出し、アウトリーチした。この際、低温排熱の民生利用は、30～40年の投資回収を前提としており、計画段階でも労力と時間を有する。その中で3)の費用便益分析を行うシミュレーションツールを開発した。また、シミュレーション結果とともにコミュニケーションツールの一つとして、社会実装を促すポイントを整理した冊子を作成した。

3.5 政策影響シミュレーション

3.4で検討した費用便益分析及び社会実装支援策は、特定地域での事業化を想定して検討したものである。本項では、より広域な政策の影響として、国のエネルギー政策と廃棄物処理の広域化を含めた清掃工場の統廃合のタイミングを分析できるモデルを構築した。地域特性に応じた自治体の意思決定を分析するため、他の技術オプションとの定量的な比較分析が可能な枠組みを構築したうえで、ORの分野で学術的基盤があるスケジューリングモデルとして分析した。

特に、廃棄物政策の主たる関心事である人口動態、広域化、エネルギー回収効率、エネルギー政策

を統合的に分析できるモデルづくりに注力した。本研究課題では、広域化政策に関するデータの入手可能性と産業の多様性を鑑み、3.3でデータベースを開発している愛知県を対象に分析した。長期の政策シミュレーションは、不確定要素を扱う必要があるが、本サブテーマでは、ある時点での変数を静的に準備し、モデルを構築している。ただし、変数は操作的に扱えるようにしており、今後の長期の政策シミュレーション研究の発展に寄与できるものとなっている。

まず、3.3の1)で提示した地域特性データベースと政策影響シミュレーションの関係を概説する。分析の基盤となる廃棄物の発生および分別後の発生量については、1km×1kmメッシュ単位で推計する。現状では、人口密度と自治体ごとの組成および分別の実態に合わせてデータを格納している。人口動態の将来シナリオ、ライフスタイルに伴う一人当たりの種類ごとの廃棄物発生量、自治体による分別政策を変数化しているため、メッシュから発生する廃棄物の組成ごとの発生量に関するシナリオを作成し、パネルデータとして格納することが可能である。なお、廃棄物の種類は、廃プラスチック、廃紙、生ごみ、その他の4種類に集約している。ただし、今回の分析では、廃プラスチック、廃紙、生ごみのリサイクルおよびエネルギー回収は主目的ではないため、現状の分別状況を想定している。次に、収集については、収集範囲を任意に設定可能であるが、本研究課題では、現状の自治体の境界および愛知県が公表している「第2次愛知県ごみ焼却処理広域化計画（平成20年度～29年度）」（以後、愛知県広域化計画）の広域化ブロックの2層を想定している。1km×1kmの廃棄物発生分布と収集範囲を定めると収集・運搬に関する費用およびCO2排出量は、サブテーマ3で詳細に記述している修正Grid cityモデルにより、算定することができる。

収集された廃棄物が清掃工場に運搬されたのちの処理プロセスは、本研究課題の主眼である焼却処理を前提としている。そこからのエネルギー回収方策として、現状の発電、同規模の施設で最大の効率を有する発電、産業への熱利用の3点に着目している。現状の発電施設の費用および最大の効率を有する発電の費用は、3.3の1)で実施したアンケート結果をもとに算出している。総建設費用を従属変数、焼却炉の規模(x_1)及び発電容量(x_2)を説明変数として、各種形状での回帰式を最小二乗法によって作成し、比較を行ったものである。この結果を図3.2.6に示す。焼却炉のみに乗数式を採用する $y = (x_1)^a + bx_2$ 型が最も R^2 が大きくなった。しかし、 a は2.49と1を超えるため、スケールメリットが存在せず、分散も大きいため、施設建設費用モデルとして不適と考えられるため、線形型 $y = ax_1 + bx_2$ を用いるものとする。また、フロンティアライン分析により、同規模の施設で最大の効率を有する発電の技術情報を求めたものが図3.2.7である。

以上、廃棄物発生、分別収集、処理及びエネルギー回収を統合的にモデル化した。この状況において、エネルギー政策の影響がどの程度生じるのかを明らかにするため、固定価格買い取り制度（FIT）がある状況とない状況とを仮定し、熱利用の相対的な影響を分析する。熱利用に関する技術・経済モデルは、サブテーマ1の方法論をもとにしている。そして、複数の規模の焼却炉と産業立地を想定しているため、配管長などの決定モデルは、より汎用的なサブテーマ3の方法論を用いて計算している。政策影響シミュレーションを実施するにあたって、利用した原単位を表3.2.6に示す。

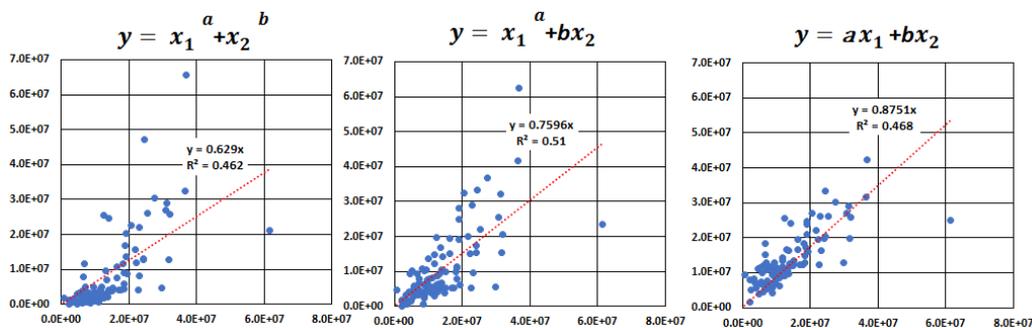


図3.2.6 各数式による総建設費用推計式の比較
(x : アンケート結果[千円]、 y : 推計結果[千円])

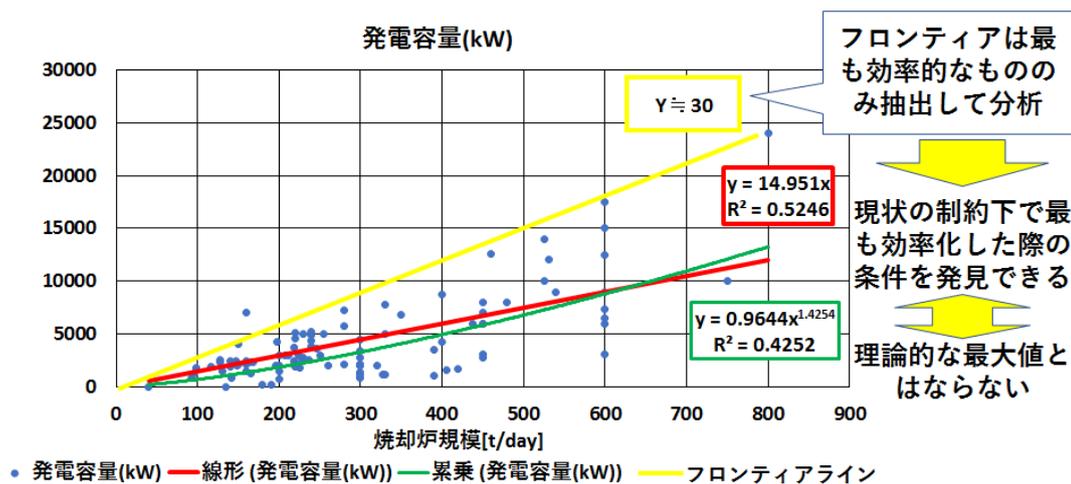


図3.2.7 アンケート結果からの最大発電容量設定

表3.2.6 政策影響シミュレーションを実施する際に用いた原単位

大分類	小分類	記号	単位	出展
低位発熱量	厨芥	3,400	kJ/kg	(14)
	紙	15,000	kJ/kg	(14)
	プラスチック	35,000	kJ/kg	(14)
	その他	17,000	kJ/kg	(14)
	熱回収率	85	%	(14)
	蒸気圧	4	MPa	(14)
	温度	400	°C	(14)
	タービンの排出圧力	0.015	MPa	(14)
タービン発電の技術変数	湿度	10	%	(14)
	タービンの排出エンタルピー	2361	kJ/kg	(14)
	タービンの効率	97	%	(14)
	稼働日数	280	day/year	(14)
輸送コスト	1km当たり1kJ蒸気輸送コスト	46.0	百万円/km	(15)
	1km当たり1t収集運搬コスト	0.000373	円/km	(15)
	焼却処理1tの運用コスト	9.61	千円/t	(15)
販売価格	バイオマス廃棄物から焼却炉で生成した電力価格	17	円/kWh	(14)
	その他の廃棄物から焼却炉で生成した電力価格	10	円/kWh	(14)
	蒸気の販売価格	77.7	円/kJ	(16)

シナリオにおける設定を表3.2.7に示す。まず、国のエネルギー政策の影響を考慮するため、廃棄物発電に対してFITが適応される場合とされない場合を想定する。これは、FITが廃棄物発電を促進しているものの、熱利用に関して阻害要因となっている点を分析するために設定している。また、それぞれのエネルギー政策下で、施設の立地とエネルギー回収方法の組み合わせで、5つのシナリオを設定した。FIT政策ありの時の各シナリオを概説する。S1-Base-FITは、現状の実績値に基づいている。S2-IncMAX-FITは、前述のフロンティアライン分析に基づき、現状の立地で施設規模の最大発電量の設備に更新したことを想定している。S3-SE-FITは、現状の立地で工場での熱利用を実施することを想定する。S5-WC_IncMAX-FITは、広域化計画が実現し、その際に施設規模の最大発電量の設備を導入することを想定している。S5-WC_SE-FITは、広域化計画が実現し、その際に工場での熱利用を実施することを想定している。それぞれについて、総建設費用、熱導管建設費用、運用費用を求め、償却期間を15年と想定し、年間当たりの費用を算出した。年間の収集・運搬費用とあわせ、総費用(百万円/年)と

する。エネルギー回収による便益は、売電益（百万円／年）と蒸気販売益（百万円／年）とし、そう便益（百万円／年）を算定した。

なお、本研究課題では、人口動態、ライフスタイル、清掃工場・産業立地等は一定として算定している。いずれも本モデルにおいて操作的に扱えるため、今後、多様なシナリオ下での長期政策シミュレーションを実施する基盤となっている。

表3.2.7 長期の政策シミュレーションのシナリオ設計

シナリオ名	FIT 設定	施設立地	エネルギー回収
S1-Base-FIT	現状 (FIT)	現状	現状 (Base)
S2-IncMAX-FIT	現状 (FIT)	現状	発電最大化 (IncMAX)
S3-SE-FIT	現状 (FIT)	現状	熱利用 (SE)
S4-WC_IncMAX-FIT	現状 (FIT)	広域化 (WC)	発電最大化 (IncMAX)
S5-WC_SE-FIT	現状 (FIT)	広域化 (WC)	熱利用 (SE)
S6-Base-N	廃止 (N)	現状	現状 (Base)
S7-IncMAX-N	廃止 (N)	現状	発電最大化 (IncMAX)
S8-WC_Base-N	廃止 (N)	広域化 (WC)	現状 (Base)
S9-WC_IncMAX-N	廃止 (N)	広域化 (WC)	発電最大化 (IncMAX)
S10-WC_SE-N	廃止 (N)	広域化 (WC)	熱利用 (SE)

* 現状施設の評価を行う。実際には施腕に払ったサンクコストが含まれるが、サンクコストはすべてのシナリオで同じになるので除外。

比較のため、全て現状の施設のまま、第2期にすべて再更新されたものとして計算を行う。

また、いつの時期に更新を行うかがシナリオ評価に影響しないよう、割引率を使用しない分析を行った。

加えて、各政策化で、2040年までに各清掃工場が改良と更新を実施した場合、システム全体として費用便益を最適化した場合の選択行動を分析するスケジューリングモデルの構築を試みた。だが、実態の選択行動との整合性などを表現するには課題が多いため、モデルは更なる精査が必要となる。

定式化にあたり、前述のシナリオ分析での費用便益の結果が清掃工場 (J) の技術選択肢 (I) として用いる。ここで、自治体がある広域化ブロック k 内に立地する清掃工場 j を各年度 t に、廃止を含む技術選択肢 i の選択を決定する問題を考える。自治体は、各清掃工場について、広域化ブロック内の総費用が最小となるような選択をする。以下にモデルを示す。

記号の定義:

集合

J: 清掃工場 j の集合、 $j = 1, \dots, \bar{J}$ 、

I: 技術選択肢 i の集合、

$i = 1$ (現状立地・現状発電)、 2 (現状立地・発電最大化)、 3 (現状立地・熱利用)、 4 (広域化・発電最大化)、 5 (広域化・熱利用)、 6 (広域化統廃合に伴う廃棄)

I' : 統廃合 (広域化・発電最大化、広域化・熱利用) の選択肢の集合

I^n : 現状立地・発電最大化、現状立地・熱利用、広域化・発電最大化、広域化・熱利用、広域化統廃合に伴う廃棄の集合

T: 年度 t の集合

P: 統廃合ペアの集合

J_p^d : 統廃合ペア p の統合する清掃工場の集合

J_p^g : 統廃合ペア p の統合される清掃工場の集合

J^n : 統合される清掃工場と統廃合リストに入っていない清掃工場の集合

定数

\bar{J} : 清掃工場数 (=41、愛知県)

\bar{T} : 最終年数 (=30)

$C(j, i)$: 清掃工場 j の技術選択肢 i の費用

$P(j, i)$: 清掃工場 j の技術選択肢 i の便益

K : 寿命 (=30)

決定係数

x_{ijt} : 年度 t に清掃工場 j で技術選択肢 i を行うとき1、その他0

u_{ijt} : 年度 t に清掃工場 j で技術選択肢 i を選択した際の経年変化

定式化

$$\text{minimize} \quad \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} (C(j, i) - P(j, i)) x_{ijt} \quad (2)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{j \in J} x_{ijt} \leq \bar{J} - 1 \quad i = \text{Disposal}, \forall t \in T \quad (3)$$

$$x_{ijt} \leq x_{ij,t+1} \quad i = \text{Disposal}, \forall j \in J, t = 1, \dots, \bar{T} - 1 \quad (4)$$

$$x_{ijt} \leq x_{ij,t+1} \quad \forall i \in I^r, \forall j \in J, t = 1, \dots, \bar{T} - 1 \quad (5)$$

$$x_{ijt} \leq x_{ij,t+1} \quad i = \text{heat}, \forall j \in J, t = 1, \dots, \bar{T} - 1 \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J^n} x_{ijt} \leq 1 - x_{ij,t+1} \quad i = \text{present}, \forall j \in J, t = 1, \dots, \bar{T} - 1 \quad (7)$$

$$x_{ij,t+1} \leq x_{ijt} \quad i' \in I^r, \quad i = \text{Disposal}, \quad \forall t \in T, \quad \forall j' \in J_p^d, \quad \forall j \in J_p^g, \quad \forall p \quad (8)$$

$$\sum_{t \in T} x_{ijt} = 0, \quad \forall i \in I^r, \quad \forall j \in J^n \quad (9)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ijt} = 1, \quad \forall t \in T, \quad \forall j \in J \quad (10)$$

$$u_{jt} \leq K, \quad \forall t \in T, \quad \forall j \in J \quad (11)$$

目的関数は、純費用便益の最小化である。制約条件(2)は、清掃工場は広域化ブロック内に必ず1つ必要とする。制約条件(3)は、 t 年で必ず1つ選択する。

費用便益の定義

$$C = f_1 + f_2 + r_1 + r_2$$

f_1 : 清掃工場の建設費

f_2 : エネルギー回収設備導入費 (発電設備改良、熱導管敷設)

r_1 : 施設運営費

r_2 : 廃棄費

$$P = r_1 + r_2$$

r_1 : 売電収入

r_2 : 蒸気販売益

制約条件 (3) は、清掃工場はブロック内に必ず 1 つ必要とする。制約条件 (4) は、廃棄後は廃棄を必ず選択する。制約条件 (5) と (6) は選択肢の年次毎の変更を制限する。制約条件 (7) は現状から別オプションを選択後は現状を選択しない。制約条件 (8) は統廃合される清掃工場は廃棄される。制約条件 (9) は統合される清掃工場と統廃合リストに入っていない清掃工場は統廃合オプションは選択しない。制約条件 (10) は各年の選択は 1 つ以下とする。制約条件 (11) は t 年で各清掃工場は寿命に達さない。制約条件 (12) は減価償却が完了するまでは使用する。

4. 結果及び考察

4.1 検討に向けた学術的な研究の位置づけ

産業共生、廃棄物からのエネルギー回収、第4世代地域熱供給の社会実装および普及促進策に関する研究をもとに、図3.2.8にフレームワークを提示し、本サブテーマの研究実施項目との関連性を明確にした。産業共生研究では、事業化の進捗に着目し、フェーズごとに分析する方法が提起されており、それに則る。これは、低温排熱の民生利用においても適応可能なため、高度な地域熱利用の全般を分析することができる。

まず、フェーズ1において、候補となる地域を特定し、設計と費用対効果の概算を行う。本研究では、3.3及び4.3において、インターフェースの開発と地域特性データベースを用いてのこのフェーズに対応する。次に、フェーズ2において特定地域における技術・経済的フィージビリティ分析を実施する。ここでは、フェーズ3におけるビジネスモデルの設計、すなわち費用、便益、リスクの配分を契約によって取り決める段階である。本研究では、特定地域での費用便益分析を実施する。ただし、国内ではビジネスモデルの構築には阻害要因が多いため、3.2及び4.2の調査に基づいた実態分析と緩和策を論じている。そして、それらの結果を受けて、社会実装支援の在り方を論じる。さらに、個別の高度な地域熱利用事業の進展に加えて、他地域への水平展開を意図したScaling up¹⁷⁾のフェーズも対象とする。本研究では、政策影響シミュレーションがそれにあたる。これらフェーズごとに社会実装に向けた要件あるいは研究課題を明確にすることで、高度な地域熱利用を促進する社会インフラ・制度を具体的に検討することが可能になる。

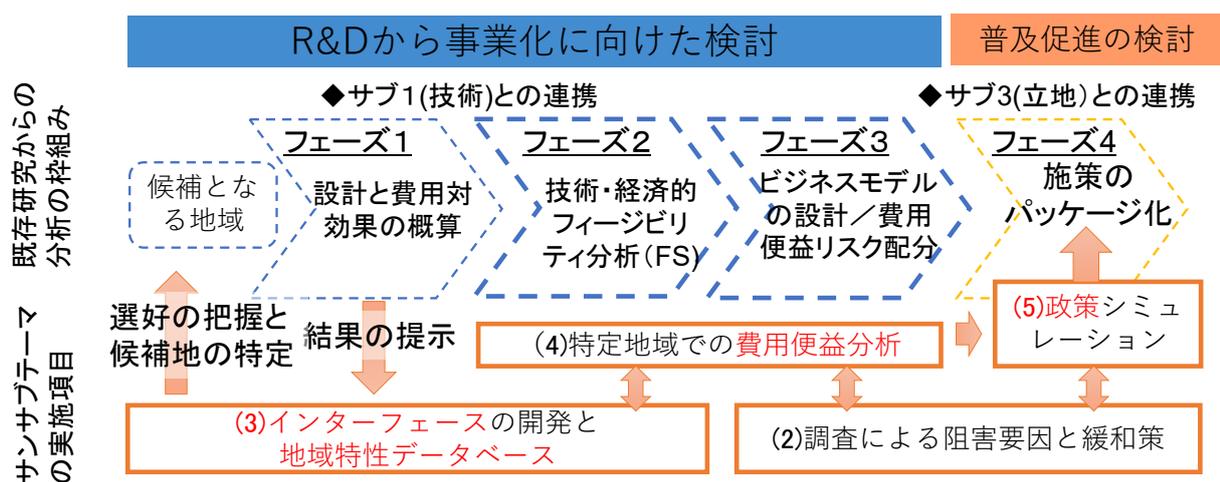


図3.2.8 本研究課題のサブテーマの学術的な位置づけ

4.2 事例調査に基づく廃棄物からの高度な地域熱利用の阻害要因とその緩和策の抽出

本項では、国内の実態調査と海外のベストプラクティス調査の結果を論じる。その際、3.3及び4.3で実施した一般廃棄物の清掃工場のアンケート調査から得た知見を根拠にする箇所を含める。これは、実態調査をもとに、アンケート調査を設計し、その定量的な裏付けを確認したためである。そのため、記述の順番は逆になるが、アンケートの結果は後述し、本節ではそこから得た知見の一部を用いる。

1) 産業での高度な地域熱利用を促進する要件

まず、国内の現状と阻害要因を記述する。一般廃棄物処理を行っている自治体または一部事務組合は、そもそも民間工場に熱供給する発想がない。工場での焼却炉利用について、151 (40.6%)の自治体または一部事務組合が「近くに熱需要のある工場がない」。これはサブテーマ3での分析とも一致する。あるいは、97 (26.1%)の自治体または一部事務組合が、と回答している。そして、「検討したことがないし、事例を知らない」と回答していると回答している。一方、工場利用に関心をもつ自治体または一部事務組合は、関心を示しており、潜在的な実装可能性はありうる。また、インタビュー調査や自由回答において、地域熱利用は、高い温度の熱は高い温度熱で使いたいとの認識をもつ工場管理者も一定数いる。また、産業廃棄物事業者は、インタビュー調査を通じて、製造業の低炭素化の動きと連動し、より積極的にエネルギー回収効率を高めようというインセンティブが働いている。ここから示唆されることは、焼却炉からの回収蒸気を工場利用する仕組みは、将来オプションとして十分に検討する意義がある点である。

そこで、まず清掃工場が改良・更新する際の技術選択の実態を分析する。今回の調査では、産業廃棄物処理施設と比較して、網羅的に分析対象としやすく、社会インフラ・制度による影響が大きい一般廃棄物の清掃工場を主に実施した。まず、自治体が清掃工場を改修・更新する際の優先順位は、あくまで周辺住民の理解と施設の低コスト化、交付金の獲得が主である。その内訳は後述する。そのため、現状の枠組みでは、積極的に選択することは期待できない。周辺住民の理解の面では、新設時に工場団地付近・内に移設する場合、交通需要の増加の懸念があるほか、特定の民間企業へ蒸気販売することが公平性を担保できるかという懸念もある。そして、低コスト化や交付金の獲得では、現状ではFIT制度もあり、エネルギー回収は発電が主流である。そして、交付金の要件を満たすように発電効率を設計している事例が多い。発電の廃熱を利用した付随する温水プールなどの熱供給施設の開発意図も、あくまで地域貢献を主眼としており、住民への住民説明に利用している。そして、その際の熱販売価格は、10か所 (全413か所)を除いてゼロである。そのような現状のため、自治体は大中規模であれば高効率発電を選択し、一部の廃熱を地域貢献に利用するのが一般的となっている。一方、小規模の清掃工場は、単独での発電では高コスト、低エネルギー回収効率になることもあり、広域化による統廃合が進みつつある。

工場での熱利用という技術オプションは、サブテーマ1の結果からも明らかなように低コスト化、エネルギー回収効率の面で発電よりも有利である。また、小規模の清掃工場でも有効であることが示唆されている。しかし、積極的に検討が進まないのは、サブテーマ3で検討している立地の問題に加えて、熱配管のコストが高いと認識されている点、民間企業との交渉プロセスや蒸気価格の設定などが不明瞭である点、手続の煩雑さが理由として挙げられている。これらは、インタビュー調査でもたびたび投げかけられた要因である。

一方で、高温熱を利用する産業側あるいは熱供給にかかわる事業者側は、課題を認識しつつもビジネスチャンスと捉える傾向がある。まず、熱利用する工場は、エネルギー・セキュリティの確保を課題と指摘している。また、すでに化石燃料業者とすでに契約している場合、低価格の条件であった長期契約の見直しやそれに伴う今後の関係性への懸念もある。ただし、価格面で不利にならないければ、温室効果ガスの排出報告値の原単位が下がることとあわせて、利用に前向きな意見が挙げられている。熱供給の仕組みについては、収益構造は、化石燃料価格と蒸気価格の設定次第なので交渉の枠組みが必要である点、初期投資額の精査と補助の有無、さらに費用の負担を交渉する枠組みが必要である点、熱管理による付加価値の創出が課題となる。また、廃棄物発電の系統接続の課題出てきていること、熱利用等の技術の実装に課題がない点、蓄熱技術・情報技術との連携を改良していくことで付加価値を高められることなど清掃工場からの熱利用を促す環境が整いつつある。産業セクターでは、工場内での省エネによる低炭素化の限界費用が高まっていることを鑑みると、清掃工場からの蒸気を購入するインセンティブは十分に持ちうる状況にある。

このように熱供給の主体となる清掃工場と熱利用の工場の需給をマッチングするには、いくつかの課題と阻害要因があるものの、その緩和策を明らかにし、社会インフラ・制度での保管をすることで普

及が見込まれる状況にある。

ここで、すでに先行している韓国のベストプラクティス調査から得た社会実装に向けた知見を論じる。韓国において清掃工場からの工場への熱利用が実現し、普及したのは、韓国エコ・インダストリアル・パーク（EIP）構想に基づく、社会実装支援を行う体制づくりによるところが大きい。詳細は、既報¹⁸⁾で発表している。ここでは、主要な3点を記述し、日本への展開に向けた示唆を考察する。

まず、韓国では、国から個別事業までの階層的な支援体制を整備している。図3.2.9に具体的な支援主体を示す。韓国EIPプロジェクトの予算は、70%が中央政府（MOTIE: Ministry of Trade, Industry and Energy、産業通商資源部）から、20%が各地方自治体から、10%が参加している企業から、賄われている。これが政府のEIP計画のための研究予算のプールとなり、新しいプロジェクトへと循環していく仕組みである。韓国のEIPはPPP（Public-Private Partnership）の一形態をとっている。また、この予算はあくまでFS調査のためのものであり、実際の事業開始のための投資資金は全て企業自身が負担することとなり、日本で行われているような施設に対する補助金などは無い。MOTIEのイニシアティブのもとKICOXが事業を管轄し、地域EIPセンターが自治体、地域産業と協働し、実質的なマネジメントを行い、事業化を見据えた体制が整っている。実質的には、地域EIPセンターが、率先して立地企業と共同でEIP事業のポテンシャルを明らかにしてマスタープラン作成し、KICOXがその事業性を適正に審査したのちにFS調査に入り、リスクを軽減するビジネスモデルが構築された段階で、事業化している。

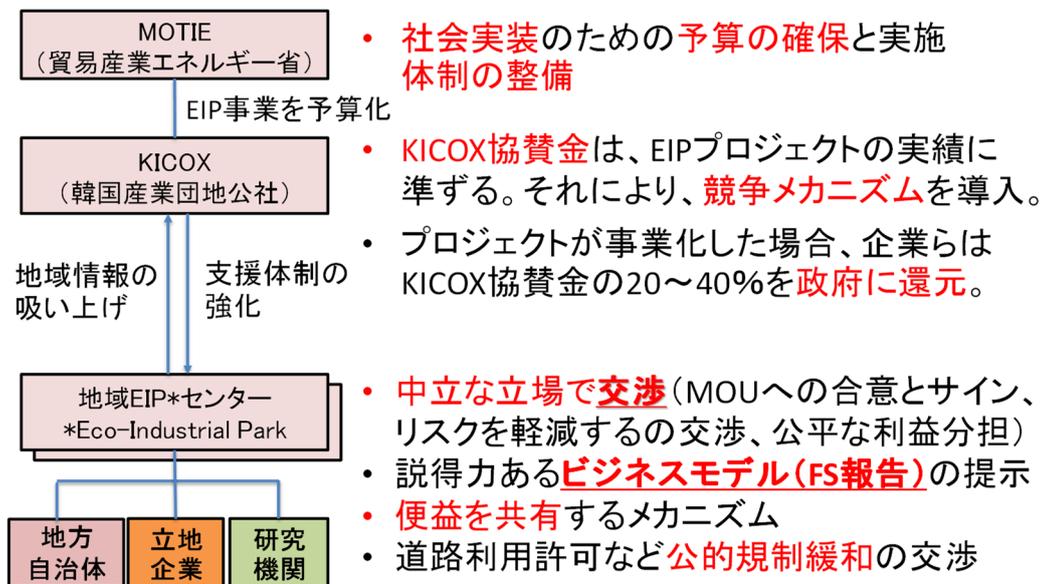


図3.2.9 韓国エコ・インダストリアル・パーク（EIP）事業の階層的な社会実装支援体制

この中で、特に重要な役割を果たしているのは、地域EIPセンターである。ここは、地方自治体、産業、研究者で構成され、①中立な立場での交渉の仲介、②企業の紹介と事業化の契約（MOU）への合意とサイン、③熱/副産物の利活用ネットワークの候補者の支援、④熱供給の停止などのリスクを軽減するための交渉、⑤障壁の緩和と参加者の公平な利益分担の確保を目的として活動している。KICOXの支援の下、地道なAwareness Raising活動を実施してきたことに加え、実際のEIP事業の社会実装にコミットすることで立地企業から信頼関係を構築してきた。そのことが立地企業のEIP事業への参入障壁を下げ、さらなる事業機会を創出する好循環を生み出したといえる。ただし、その後、EIP事業を無理に押し進めるのではなく、利益がでない事業やリスクが最小限にならない事業は実施していない方針を明確にしている。実際、提案されたEIP事業の内、承認されるEIP事業の割合は20%程度と、厳しい審査が行われている。

また、EIP事業が拡張し、ネットワーク化してきているが、地域EIPセンターは全体を最適にする意図はなく、あくまで需要家となる企業と供給家となる企業がそれぞれ相対契約を結ぶことに注力してい

る。当然、契約内容もそれぞれの事情や環境によって様々である。例えば、ある企業が複数の企業に同じ資源を供給している場合でも、価格はそれぞれで異なる。原則は、需要側が自前でその資源やエネルギーを調達した際の費用と、供給側の供給コストの間に設定され、また特にエネルギーの場合は石油の市場価格に合わせて月次や四半期ごとに見直している。この様な価格契約全般は、原則5年で更新される。その他、初期投資やメンテナンス費用の負担割合、リスク条項などの諸条件を含め、どの様な契約が相応しいかを、事前のFS調査でビジネスモデルの一環として綿密に検討、及び各企業と交渉がされることとなる。

地域EIPセンターにとっては、企業の実際の投資を促すためにFS調査で、EIP計画に参加することにより必ず収益を上げられることを企業に示すことが求められる。その過程で、特に、利益の配分や、他社に提示をすることが難しいそれぞれの原価に基づいた価格設定など、企業間で行うのが難しい課題について、交渉の仲介をして契約成立を支援することが大きな役割となっている。

国内の熱融通事業は、事業ごとにコンソーシアムを結成し、それぞれ国の補助予算の獲得することが多い。その後は、詳細なフィージビリティ調査の策定、ビジネスモデルを計画、契約、事業化、運営へとフェーズを進めるが、韓国からの示唆は、そのプロセスを一貫して支援する体制であり、一か所の成功例を他事業へと展開できる機能を有する社会実装支援組織を育成している点といえる。

2) 焼却熱の低温排熱の地域利用を促進する要件

まず、国内の現状と阻害要因を記述する。一般廃棄物処理を行っている自治体または一部事務組合は、地域熱供給事業として、蒸気または温水に価格を付けて事業化する意図は少ない。自治体は、熱需要がないうえ、配管コストが高いと捉えている。その観点からすると、熱密度の高い区域を明確にし、事業化を進めることが有効と考えられる。しかし、既存の熱供給事業について、熱需要を代替する導管密度と収益率の相関係数は、0.093であり、有意な関係にない。これは、熱密度の様なマクロな数値ではなく、一つ一つの需要の種類を細かく見ていく必要があることを示唆している。一見すると熱需要密度が低い地域でも需給バランスを適切に評価することで事業化を検討するに値する可能性もある。ここで、地域熱事業のビジネスモデルについて、対照的な都心・温暖型と地方・寒冷型の代表例として、東京臨海熱供給事業と岩手県紫波町の地域エネルギー事業の二つの調査結果を示す。

東京臨海熱供給は、熱製造プラントは主に電力と都市ガスを燃料として利用している一方、近隣の有明清掃工場やその他発電所等からの排熱を熱源として再利用し、これらの総量は熱源エネルギー全体の約1/5を占めている。温熱、冷熱それぞれの販売売上高は、東日本大震災の発生した2011年を除き、近年は60億円を超える規模で安定的に推移している。特筆すべき点は、その営業利益率で、2011年以外は全て10%を超え、2015/16年に至っては30%近くにまで達している。現時点においても安定的な営業収益を得られている一番の大きな要因は、安定的で高負荷の熱需要家に支えられている点が最も重要であろう。実際に同社は47件の業務系の需要家に供給し、またその種類もオフィスビル、商業施設、イベント施設、ホテル、病院など幅広いポートフォリオを持ち、それが安定的で高負荷な熱需要へと繋がっていると考えられる（サブテーマ1で示すように、この優位性は低温温熱供給へのヒートポンプの普及に思内低下する可能性はある）。もちろん、本事業は、東京都によって1980年以降に行われた臨海副都心開発の一環として行われ、東京都からの出資やその地域の建物が熱供給を前提として建設されたため、3兆円と言われる初期コストの負担が軽減されていた点が非常に大きかった点を留意する必要がある。そのため、都心部では、熱需要が密で、多様で事業計画を立てやすく、収益性も確保できる可能性はあるが、建設コストを投資回収するにはハードルが高いという現状を緩和していく必要がある。

一方、岩手県紫波町の地域エネルギー事業は、そもそも高い収益性を求めておらず、地域のインフラとして機能することに目的を置いている。そのため、30年間で投資回収をすることになっており、その事業の持続性に主眼が置かれている。この事業の成立要因は、まず一番に、地元自治体（紫波町）との緊密な連携、及びそのバックアップである。循環型社会というビジョン実現のために、木材チップの供給販路の確保、熱需要家として参画するなど大きなサポートがあった。二つ目は、事業の立ち上げ

を、地域全体の開発初期から同時並行的に行えたことが挙げられる。三つ目は、コンパクトなエリアに需要家が集まっているため、配管コストが押えられたことである。最後に、国の補助を活用出来たことが挙げられる。先に述べた通り、環境省から配管工事費に相当する1.5億円が、また国土交通省からは住宅における設備工事への補助が交付されている。以上の様に、オガールエリアでの熱供給事業が複数の特殊な要因により成り立っていることを鑑みると、同様の事業が成立するためには、少なくとも現在の日本では、熱供給事業を民間だけで行うことは困難であり、様々な面での環境整備が必要であると考えられる。

一方で、デンマークでは、1970年代のオイルショック以来、エネルギー政策に関して国民的な議論を経て政治的コンセンサスを経てきた経緯があり、その中で地域熱供給を促進することが合意形成されてきた。もともと地域熱供給がある程度普及していたこともあるが、主力であった石油由来の暖房が402年かけて、地域熱供給に移行し、2012年現在では民生需要の82%が接続するに至っている¹⁹⁾。ここには、大きく3つの制度が関与している。一つは、電気供給法の中でCHP（熱電併給）の推進が明記され、それを実現するために地方自治体に地域エネルギー計画の策定を義務付けている。そのため、エネルギー関連施設を建設する際には、地域熱供給を検討することが要件となっている。もう一点は、独立組織であるデンマークエネルギー規制局（Denmark Energy Regulation Authority）が電力、ガス、熱の価格を承認し、公表している点がある。これにより、事業の透明性が確保され、健全な競争が促されている。また、この際に後述する地域エネルギーモデルに関連する技術・経済変数も公表し、継続的に更新している点も重要な点である。さらに、政府のデンマークエネルギー庁（Denmark Energy Agency）が社会経済費用対効果算定の仕組みを提供しているため、地域熱供給事業のビジネスモデルの立案、実施の意思決定が比較的容易にできる。この3つの制度的な基盤が地域熱供給の普及に大きな役割を果たしている。翻って、国内では、国のエネルギー政策の中で地域熱供給の位置づけは低く、地域熱供給法は2019年度の改正されたものの、利用促進には至っていない。地域熱供給事業で重要な自治体への計画義務や価格の透明性を担保する仕組みは、日本に多くの示唆がある。

続いて、廃棄物処理セクターの視点から、デンマークの地域熱供給事業を整理する。まず、デンマークでは、地方自治体が一般廃棄物および産業廃棄物のすべてを管理している。2006年の報告では、平均179トン/日（最大600トン/日）の28基の焼却炉が稼働しており、それが有するコジェネで、国全体の3%にあたる1.47百万MWhの電力と、18%にあたる6.36百万MWhの熱供給がなされている¹⁹⁾。自治体の焼却炉は、非営利企業の熱供給事業者が熱を売却している。前述したようにデンマークでは、全ての自治体に熱利用計画が義務付けられており、国の承認した価格で取引がなされる。そのうえで、化石燃料由来のエネルギーには課税されるため、廃棄物からの熱の価格が最も費用便益が高い状況になっている。それに加え、焼却炉のコジェネは、メンテナンスによる休止があるものの、稼働時は安定した熱供給減であるため、地域熱供給事業者は、廃棄物からの熱購入に積極的である。

実際のビジネスモデルを検討する際には、日本国内で注目されているドイツのシュタットベルゲから学べる点も多い。特に、社会実装を担う組織として、シュタットベルゲのような公益機関が地域エネルギー事業とともにインフラ整備、そこからのサービスの提供する機能は有効である。本研究課題では、そうした社会実装を担う機関がビジネスモデルを構築する機会を増加させる策をデンマークの事例から抽出した。特に、焼却炉からの低温排熱の民生利用にむけたビジネスモデルを作成する観点から成功要因を記述している。結論から言うと、デンマークでは、40年間という長期間で社会経済コストを最小化するための仕組みを発展させてきた。これは、地域熱供給ネットワークは、公共インフラの一つであり、短い投資回収ができずとも、中長期的に必要なと判断できる事業を実施するというコンセンサスが各ステークホルダーで共有されていることの表れといえる。まず、「The Danish Heat Atlas²⁰⁾」といった熱需要密度をGIS上で表示し、ウェブサイト上でオープンになっている。ここでは、特定の建物レベルでの熱需要に関するデータも開示されている。これは、EUが主体で発表した「欧州熱ロードマップ2050²¹⁾」の取り組みの具現化したものの一つで、計画を立てる自治体、事業化を目指す企業にとっての基礎情報となっている。ある程度の熱需要が見込める地域では、こちらも公開されたシミュレーションツールを利用して簡易なフィージビリティ分析を実施できる。その代表的なものが、第4世代地域熱供

給を提唱したProf. Lundらオールボー大学の研究グループが公表している「Energy Plan²²⁾」である。特徴的なのは、熱需要を時間単位、1年間で設定したうえで、系統電力と利用可能な再生可能エネルギー（PV、風力、焼却熱、産業廃熱、下水汚泥廃熱等）の最適な組み合わせを推計できる。また、この際に重要な変数となる2030年までの技術・コスト・性能情報をDERAが公開することで、より中長期にわたるシミュレーションが可能になる。最後に、事業化に向けて、建設・エネルギー系コンサルティング会社、建設会社、メーカーが連携し、社会経済フイージビリティ調査を実施するノウハウを蓄積しているため、正確で妥当なビジネスモデルを構築することが比較的容易である。その際、DERAが将来の燃料コストの予測をしている点や初期投資時の低融資ローンの仕組みなどもそろっている。これら社会実装時の支援ツールを図3.2.10に整理した。なお、こうした支援ツールの充実化の背景には、デンマークでは、1903年から廃棄物処理施設からの蒸気供給（第一世代熱供給）を実施してきた歴史的経緯がある点も大きい。また、廃棄物処理政策の観点からは、熱供給と接続することで、廃棄物を適正処理することに加え、熱供給による利益および処理費収入により賄うことが可能という認識が形成されたといえる。具体的には、デンマークの廃棄物処理事業は、近接する自治体が自ら出資した公社によって運営されており、熱供給の収入を確保できるとともに、一般廃棄物と産業廃棄物が同じ施設で処理されているため産業廃棄物の処理費収入が見込めるうえ、廃棄物税、売電・熱販売収入の便益と施設運営費、施設メンテナンス費、人件費の費用が年間でバランスするように経営されている点が地域熱供給との連携に有利な要件となっている。

岩手県紫波市の事例では、市のイニシアティブのもと事業化した要因が、デンマークでは国の政策から事業化支援の体制までそろっている。また、デンマークではコペンハーゲンをはじめとする都市部でも地域熱供給システムが構築されている。これは、東京において地域熱供給の実現と既存の地域熱供給のネットワーク化を検討する際に大いに参考になる。もちろん、日本と比較して、寒冷地のため暖房需要が大きいことは確かである。しかし、それでも制度面での支援があるからこそ、ここまで地域熱供給が進んだと考えるべきであろう。日本では、清掃工場からの低温排熱を民生利用する場合、廃棄物部局が地域熱供給事業法のもとで事業化を目指すことが一般的である。だが、デンマークのように自治体レベルでの地域エネルギー計画の中の一環として焼却炉を位置付けることが重要だといえる。さらに、それを補完するための情報公開の仕組み、支援ツールの開発を国レベルで実施することで、迅速で、信頼性のあるビジネスモデルの構築が可能なるだろう。

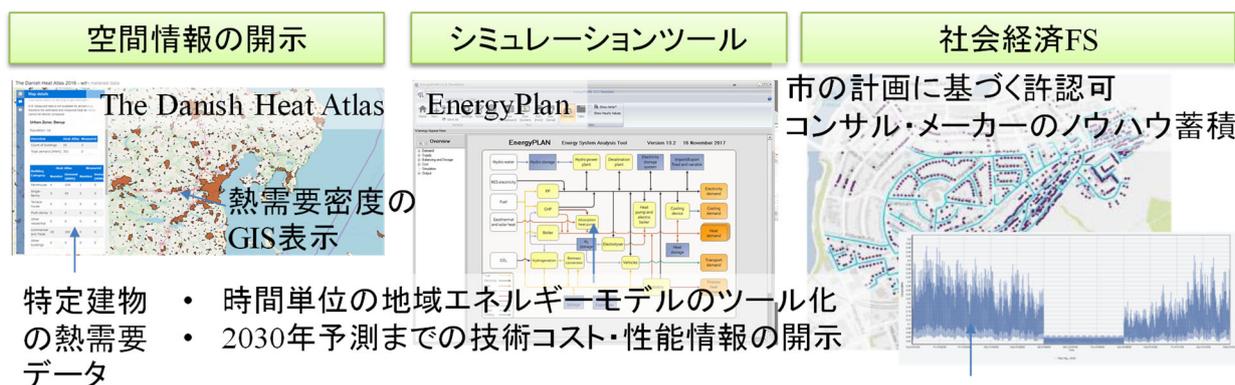


図3.2.10 デンマークにおける地域エネルギーシステムの社会実装に向けたツール群

3) 国内の環境政策への考察

表3.2.7に、焼却熱の産業利用のベストプラクティスである韓国の調査、低温排熱のベストプラクティスであるデンマークの調査を社会実装支援枠組みと制度の面から整理した。いずれの場合も3つの視点の施策から整理することができる。第一に、国から事業までの階層的な支援体制が整っていることである。韓国の場合、国家予算を使って国家EIP計画を策定し、そのもとに政策推進を強化するKICOXと主体的に社会実装する地域EIPセンターを連携させることで、国、自治体と事業ステークホルダーを支援

する体制が整っている。デンマークでは、国の法律により、焼却炉コジェネの熱導管への接続検討と自治体による地域熱供給事業計画策定が義務化されている。さらに、第三者機関による社会経済評価を含めた価格調整機能の信頼を担保することで社会実装が進みやすい環境が整っている。第二に、社会経済フィージビリティ調査およびそこに含まれるビジネスモデルを策定するための環境が整備されている。韓国の場合、地域EIPセンターが費用・便益・リスクの配分の交渉プロセスに当事者として参加しており、その経験の中で暗黙知を形式化するとともに、KICOXを通じて複数地域の知見を蓄積している。デンマークでは、40年間での償却を見据えた地域エネルギー事業を実現できるよう、税・補助金などで他のエネルギーに対する競争力を担保してきている。第三に、事業化に際してのコーディネート機能が充実している。韓国では、地域EIPセンターが、利害調整、規制緩和の調整、行政支援促進補助、信頼関係醸成といった地道な活動から、価格交渉を契約の直前まで支援しているため、清掃工場を含む事業者が検討する障壁が低くなっている。デンマークでは、上記の法律により、ある程度の市場が確保された中で、地域エネルギー会社が事業化スキルを高めてきた経緯がある。そのため、事業主体がステークホルダーを巻き込み、コーディネートする機能が十分に養われている。

翻って、国内の高度な地域熱供給を進める社会インフラと制度は、国、自治体、事業レベルでの階層的で一貫した支援体制が欠けており、個々の事業レベルでの力量に委ねられている点が重大な課題といえる。そのため、高度な熱利用オプションの国内実現事例を増やし発信するとともに、制度面での社会インフラ面でのといった研究課題を着実に進めていく必要がある。ベストプラクティス調査から、国のエネルギー政策における熱利用のロードマップ策定、廃棄物処理事業の経営収支にかかわる法整備の再検討、廃棄物/循環、エネルギー法制度での熱利用の位置づけ、自治体における地域熱・エネルギー利用計画が制度的な課題となる。そして、社会実装支援策として、清掃工場の収益性・公共性の向上に向けたビジネスモデル作成、実施、知見の集約する機能を有する支援組織の設立が有効な手段だと結論付ける。加えて、一般廃棄物・産業廃棄物の同時処理の検討、一般廃棄物処理の運営組織体の検討、地方財政政策としての再検討、立地面での高度な熱利用を誘発する土地利用政策の検討、工場跡地利用政策との連携などの検討が今後の重要な課題となる。

表 3.2.7 ベストプラクティス調査のまとめ

	韓国のベストプラクティス調査 【社会実装支援枠組みと制度】	デンマークのベストプラクティス調査 【社会実装支援枠組みと制度】
国から事業までの階層的な支援体制	国家予算を使つての社会実装のための組織設立	法律によるCHP接続と計画策定の義務化
社会経済フィージビリティ分析/ビジネスモデル	費用・便益・リスクの配分の交渉プロセスの形式知化と蓄積	40年間での償却を見据えた地域エネルギー事業。税・補助などで競争力を担保
コーディネート機能	利害調整、信頼関係醸成等の地道な活動から価格調整の補助まで	地域エネルギー会社の事業化スキル

4.3 一般廃棄物の清掃工場の実態調査と地域特性データベースの構築

1) 一般廃棄物の清掃工場の実態調査

自治体の清掃工場の更新あるいは改良、エネルギー回収の選好、意思決定の要因について得られた知見を記述する。まず、清掃工場の更新あるいは改良計画を検討する際の優先項目は、第1番目の優先項目は、「周辺住民との協議」と答えた自治体が80(21.5%)で最も高い。一方、第2、第3番目の優先順位を合わせると「低コスト化」が182(48.9%)、「周辺住民との協議」が157(42.2%)、「循環型社会形成推進交付金による補助金の獲得」が101(27.2%)のとなり、回答が入れ替わる。一方で、「省エネや発電効率の改善」、「エネルギー回収による環境問題への貢献」は、一定数の回答があるものの優先順位は低いことが明確になった。また、「その他」の回答の中で、選択回答になかった延命化、長寿命化等の維持管理も含めたライフサイクルコストを挙げている自治体が9件あり、地方財政面での関心も高い

ことがうかがえる。加えて、計画策定時は、「近隣都市の動向」を情報源にすることが多く、「国内の先進事例」、「環境省のマニュアル」、「焼却炉メーカーの提案」が続く。何かしらの形で廃棄物処理関連計画の中に地域熱利用に関する記述が含まれる自治体は316（84.9%）で、ほとんどの自治体で熱利用を位置付けていることがわかる。具体的には、ごみ処理基本計画の中に記述されている場合が多い115（30.9%）。続いて、「循環型社会形成推進計画」への記述は、115（16.4%）であった。このように、計画には明記されているものの、実際に社会実装にいたるケースは少ないのが現状だといえる。

エネルギー回収の技術選択肢として、廃棄物発電、地域還元、業務ビル・住宅、工場での熱利用について、関心と実現可能性についての選好を5段階のリッカード尺度で回答を得た結果を図3.2.11に示す。廃棄物発電は、とてもある、あるいはややあると答えた自治体は、関心で224（67.0%）、実現可能性で171（51.4%）となっている。回収熱の地域還元利用は、関心で149（33.8%）、実現可能性で84（24.7%）となっている。この際、地域還元利用に関心を持つ自治体は、廃棄物発電にも関心を持っていることも明らかとなった。一方、本研究課題で主眼としている、工場利用については、関心で40（11.7%）、実現可能性で5（1.3%）であり、業務ビル・住宅利用では、関心で52（15.1%）、実現可能性で7（1.9%）である。エネルギー回収を実施する意向のある自治体は、廃棄物発電を単体あるいは、地域還元利用での熱利用を組み合わせる選好が強いことが明らかになった。同時に、工場利用と業務ビル・住宅利用に関心を持つ自治体が一定数あることも明らかになった。だが、関心のある自治体も実現可能性はないと考えているところが多い。

次に、工場および業務ビル・住宅での利用について、上記の選好を回答して理由を選択式で3項目およびそのほかの自由形式で回答を得た。これは、必ずしも上記の設問に対して、関心を持っている自治体に限った回答ではない。工場利用については、151（40.6%）の自治体が「近くに熱需要のある工場がない」、123（33.0%）の自治体が「導管コストが高いと推測される」、97（26.1%）の自治体が「検討したことがないし、事例を知らない」と回答している。自由形式での回答では、大きくすでに発電と余熱による地域還元利用をしているため余力がない点や規模が小さいため適さないといった点に関する回答があった。一方で、「規模が小さいので発電設備が設置できないので熱利用を検討したい」、「地位産業活性に貢献できる」といった回答もある。工場への熱利用の選好とその回答理由からの示唆として、サブテーマ1で検討した技術的な優位性、すなわち導管コストを蒸気販売によって回収しうる点、発電設備への設備投資を削減できる点、小さな規模の清掃工場でも導入可能な点等を適切に発信することで、一部の自治体に対しては、現実的な選択肢となりうるといえる。

業務ビル・住宅利用については、178（47.8%）の自治体が「近くに熱需要のある工場がない」、126（33.8%）の自治体が「導管コストが高いと推測される」、62（16.7%）の自治体が「検討したことがないし、事例を知らない」と回答している。この結果から、工場利用と比較すると認知度があるため、需要の確認等をすでに実施しているところが多いと推測される。また、41（11.0%）の自治体「蒸気売益収入よりもFITによる配電収入のほうが魅力的である」に回答もある。民生系への蒸気・温水販売益が売電益よりも低い傾向は、実績値からも裏付けられる。一方、「地域産業活性化に貢献できる」を選択した自治体が29（7.9%）にとどまっており、地域づくりとの連携を意図する自治体が少ない現状がうかがえる。

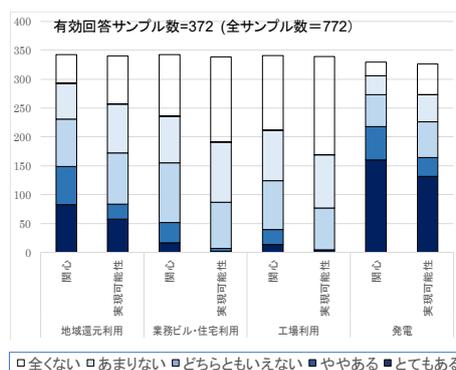


図3.2.11 エネルギー回収技術に関する自治体の選好

ここで、すでに発電、熱利用をしている清掃工場の実績値の分析結果を図3.2.12に示す。特に、熱利用の推進に際して重要な役割を果たす価格について分析するために、処理能力規模と年間の売電収入と熱販売収入の散布図を示した。発電施設を持つ403か所の清掃工場では、年度平均2,043百万円の売電益を得ている。それに対し、熱販売収益は、年度平均1.93百万円にすぎず、売電益と比較すると際立って低い。その中でも一定の収入を得ているのは、5つの地域熱供給事業法に基づく事業のみである。発電と比較した収益性の低さは、明らかな阻害要因となっている。

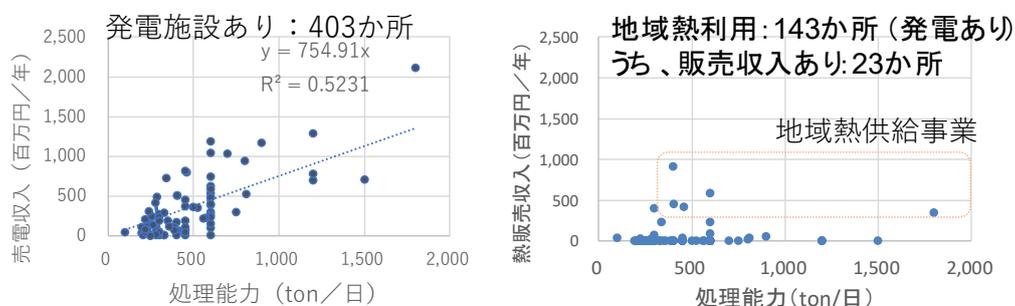


図3.2.12 清掃工場の処理能力と売電収入および熱販売収入の散布図

続いて、自治体に対し、工場との近接性の認識を確認するため、工業団地に関する質問への回答を記す。まず、自治体内に工業団地が立地しているかについて、65 (17.5%)の自治体が「存在する」と回答している。また、その中で清掃工場の立地を規制する約束を住民等と取り交わしているかについては、9 (3.1%)である。その協定を変更する可能性は、「全くない」、「あまりない」、が65.4%であり、「どちらともいえない」の36.6%とあわせて全回答となる。そのため、一度取り交わした住民協定を変更することは困難であるといえる。ただし、この回答は、清掃工場を管轄する管理者に質問しているため、事実的な裏付けは乏しいと考えられる。工場での熱利用を推進するためには、自治体内の産業部局との連携が欠かせないため、今後、より実行力のある政策を打ち出すには、産業部局の選好や連携への課題を明確にする必要がある。

また、選好に加え、物理的に近接したところに熱需要があるかどうかの認識を回答した結果を記述する。工場利用は、「200m以内に存在する」と回答したのは、8自治体、「1km以内に存在する」と回答したのは10自治体、「3km以内に存在する」と回答したのは7自治体であり、その他の自治体は、「存在しない」あるいは「不明」と回答している。民生利用は、「200m以内に存在する」と回答したのは、1自治体、「1km以内に存在する」と回答したのは12自治体、「3km以内に存在する」と回答したのは50自治体であり、その他の自治体は、「存在しない」あるいは「不明」と回答している。ただし、これは、清掃工場の管理者の認識であるため、サブテーマ3での研究のように、地理情報システムを用いた検証と実際の地理的な条件を勘案し、実現可能性を検討する必要がある。

最後に、自治体の更新、改良に関する立地選好、計画の進捗状況を記述する。結果を図3.2.13に示す。のアンケート調査から意見交換を調整した際も自治体の改良または更新、特に広域化と関連した他自治体との関係及び検討段階は、新しい技術システムを検討する際に重要な情報である。すでに決まっている自治体を見ると、「現在立地している敷地内あるいは近接地にて単独で新設」が44自治体、「廃止」が50自治体、「現敷地と異なる地区にて広域化計画による統合を伴う新設（山間部など住宅地と離れた場所）」が23自治体、「施設の延命化あるいは長寿命化を目指した基幹的設備改良」が48自治体である。単独で更新する場合、現在の敷地あるいは近接地に新設することが一般的となっていることがわかる。また、広域化は進行しつつあり、山間部など住宅地と離れた場所に統合した清掃工場を新設するケースもある。一方で、工業団地での立地に関する選好では、「現在地とは異なる地区に単独で新設（工業団地の空き地等熱需要の高い場所）」を「とてもある」あるいは「ややある」と回答した自治体は、36あり、山間部をとてもある」あるいは「ややある」と回答した自治体が49であったのと比較しても大きな開きはない。一方で、「現在地とは異なる地区にて広域化計画による統合を伴う新設（工業団

地の空き地等熱需要の高い場所)」を「とてもある」あるいは「ややある」と回答した自治体は45あり、山間部をとてもある」あるいは「ややある」と回答した自治体が68となっている。この結果から、単独であっても、広域化計画であっても工業団地内等熱需要の高い場所に新設する可能性は一定数あるといえる。

本アンケート調査で、清掃工場のエネルギー回収に関する技術・経済データ及び選好、改良・更新スケジュールに関する基礎情報と選好の分析できた。2)の地域特性データベースとともに、今後の廃棄物政策、地域エネルギー政策、産業立地政策を時系列での研究する基盤を得たことから学術的な意義は高い。一方、今回の調査は、一般廃棄物に限ったため、産業廃棄物処理場の分析は出来ていない。また、調査対象が清掃工場の管理であったため、エネルギー関連部局、産業政策部局、企画部局への拡張をすることで、より実効性の高い政策提言につながる。熱供給事業のような多くのステークホルダーが関係するビジネスを計画する場合、広範に概要を把握できる汎用的な調査手法の開発が今後の課題になる。

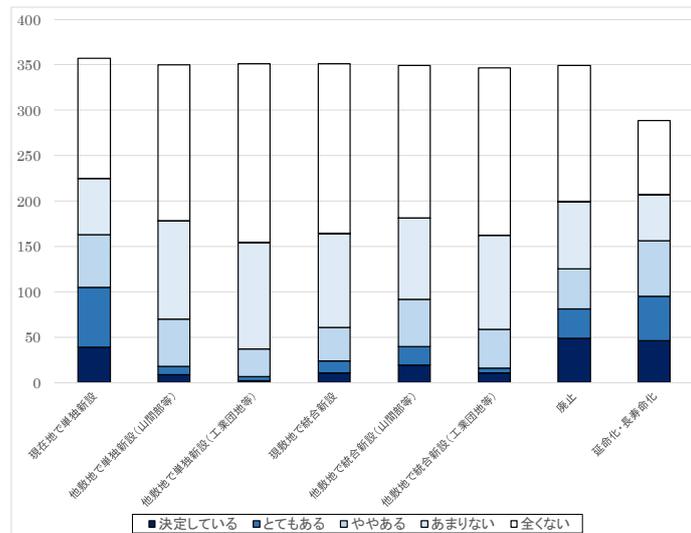


図3.2.13 自治体の更新、改良に関する立地選好

2) 地域特性データベースの内容

地域特性データベースの内容は、サブテーマ3に記載されている。ここでは、図3.2.14に(5)政策シミュレーションに用いた廃棄物発生分布メッシュ、施設情報のGIS画像およびデータ格納状況を示す。

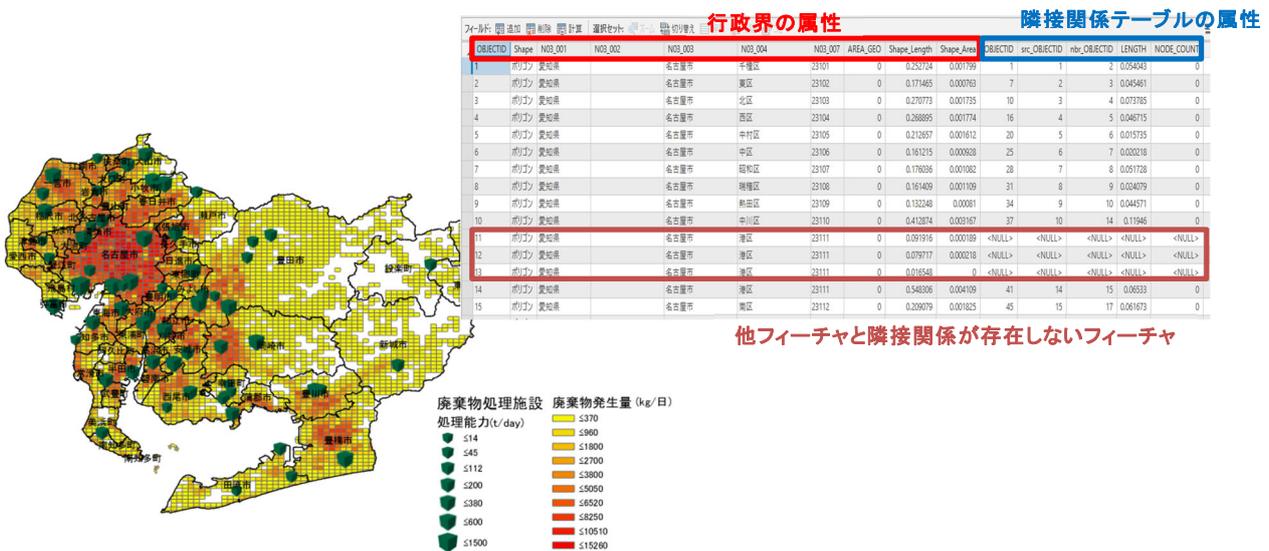


図3.2.14 地域特性データベースの出力例とデータ格納状況

4.4 特定地域での費用便益分析と社会実装支援

1) 北九州市における地域熱利用の費用便益分析

ここでは、ネットワークの発電量・熱供給量を算出し、系統電力購入量、ガス使用量等を求め、各段階の導入による便益を特定し、事業性評価（光熱費削減比、経費、単年度収支、建設費積算額、単年度投資回収年）を算定した。算定するにあたって必要となる係数を表3.2.8に示す。表3.2.9に各段階における熱需要施設への熱供給量、それに伴う各熱供給施設における発電量を示す。熱供給の増加に伴い、蒸気タービンの抽気量が増加するため、各熱供給施設の発電量は減少する傾向にあるが、一部では、熱供給施設の増加もあり、発電量が増加している供給施設もある。

表3.2.10に架空配管を想定した際の費用便益分析の結果を示す。光熱費削減額は、Step1では、30,800千円/年、Step2では、172,480千円/年、Step3では、692,840千円/年である。この額は、これまで熱需要事業者が利用していた天然ガスボイラーや熱風炉に用いていた化石燃料を削減した額である。熱供給事業者は、熱供給事業者あるいは熱管理事業者から蒸気を購入する必要がある。この額がそのまま事業体の便益につながるわけではない点は留意する必要がある。建設費は、熱導管、エネルギーマネジメント設備、熱受入設備を含み、Step2では、139,000千円/年、Step3では、429,700千円/年である。経費は、Step2では、23,753千円/年、Step3では、76,002千円/年である。ここでの経費は、主として熱供給事業者あるいは熱管理事業者が追う費用である。一部、熱需要事業者内の熱交換機管理に関する経費は、熱需要事業者が追うこととなる。表に示す単年度収支、148,727千円/年（Step2）、616,838千円/年（Step3）は、あくまで熱供給事業者あるいは熱管理事業者が、光熱費削減額を蒸気販売益に還元した場合を示している。対して、建設積算額は、Step2では、139,000千円、Step3では、429,700千円である。よって、単純投資回収年は、Step2では、0.9年、Step3では、0.7/年である。このように非常に事業性が高いことがわかる。韓国ですでに事業化した実績値から見ても、結果の妥当性はある程度、確保されている。

表3.2.11に地下配管を想定した際の費用便益分析の結果を示す。光熱費削減額は、架空配管の場合と同じである。建設費は、熱導管、エネルギーマネジメント設備、熱受入設備を含み、Step2では、386,400千円/年、Step3では、1,764,100千円/年である。経費は、Step2では、30,433千円/年、Step3では、580,809千円/年である。建設費、経費ともに架空配管よりも高額になる。以上より、単純投資回収年は、Step2では、2.7年、Step3では、3.0年である。地下埋設配管の場合でも事業性が高いことがわかる。

この試算結果は、架空の想定での建設費は、楽観的な数値となっている。しかし、地下に埋設した際の試算でも高い事業性を示している。そのため、ステークホルダーと意見交換をするにあたっては、楽観的な想定とより現実的な試算値の両方を用いることによって幅を持たせ、実質的な検討が可能になった。実際に本研究課題でも、大まかなフィージビリティ調査で、熱供給事業者との交渉を進め、その後詳細なフィージビリティ調査を実施する手順を踏んでおり、その有効性も確認できた。

詳細なフィージビリティ調査では、現段階では条件が不明な点、考慮にいていない項目を検討する必要がある。それらの例を示す。既存発電設備からの熱回収改修工事費を考慮していない点、熱供給バランスをとるための付属設備の建設費を考慮していない点、架空配管・専用トレンチのルート確保の必要がある点、熱需要施設のボイラー燃料を都市ガス50円/m³Nと想定は変動する点、熱供給による発電量削減を20円/kWhとしているが、FIT価格を考慮していない部分もある点、非化石市場価値を考慮していない点が挙げられる。これらの項目について、今後、さらに詳細に調査し、事業性評価の精度を高めていく必要がある。

表3.2.8 換算係数

項目		単位	備考
熱利用施設の年間稼働日1)	240	日	
電気事業者CO2排出係数(平均)	0.000579	t-CO2/kWh	バイオマス分は0
産業用以外から供給された熱の排出係数	0.057	t-CO2/GJ	
原油換算係数:電力	0.0002513	kL/kWh	
原油換算係数:熱	0.03509	kL/GJ	
熱利用の化石燃料換算	79.4	%	ボイラー効率
電力の化石燃料換算	42.0	%	発電効率
蒸気ボイラー効率	80	%	(高位基準)
エネルギー単価(電力)	20	円/kWh	想定
エネルギー単価(天然ガス)	50	円/m3N	想定

注1) 熱供給施設で熱供給せず全量発電の日数:125日

表3.2.9 分析するネットワークの熱需給バランス

	熱供給無	STEP1	STEP2	STEP3
熱供給量	MW/年	MW/年	MW/年	MW/年
S1	652,608	0	639,936	645,120
S2	652,608	0	608,256	645,120
S3	160,704	154,368	154,368	154,368
S4	0	0	0	0
S5	288,000	0	0	245,376
S6	213,120	0	0	183,168
熱需要量	GJ/年	GJ/年	GJ/年	GJ/年
総計	0	112,896	547,200	1,062,720

表3.2.10 費用便益分析の結果(減価償却費除く,架空配管)

		STEP1	STEP2	STEP3
◆経済的便益	光熱費削減額(千円/年)	30,080	172,480	692,840
◆建設費	熱導管(架空配管)(千円)	—	39,000	65,700
	エネルギーマネジメント設備(千円)	—	50,000	50,000
◆経費	熱受入設備等(千円)	—	50,000	50,000
	設備維持間費(千円/年)		3,390	8,697
	人件費(千円/年)		18,000	60,000
	租税公課(千円/年)		2,363	7,305
◆事業性評価	光熱費削減額(千円/年)		172,480	692,840
	経費(千円/年)		23,753	76,002
	単年度収支(千円/年)		148,727	616,838
	建設費積算額(千円)		139,000	429,700
	単純投資回収年数(年)		0.9	0.7
◆環境的便益	一次エネルギー削減量(GJ/年)	79,281	397,290	1,397,193
	CO2削減量(t-CO2/年)	4,121	20,619	72,386

表3.2.11 費用便益分析の結果(減価償却費除く,架空配管)

		STEP1	STEP2	STEP3
◆経済的便益	光熱費削減額(千円/年)	30,080	172,480	692,840
◆建設費	熱導管(架空配管)(千円)	—	286,400	1,544,100
	エネルギーマネジメント設備(千円)	—	50,000	110,000
◆経費	熱受入設備等(千円)	—	50,000	110,000
	設備維持間費(千円/年)	—	5,864	22,041
	人件費(千円/年)	—	18,000	60,000

◆事業性評価	租税公課(千円/年)	—	6,569	29,990
	光熱費削減額(千円/年)	—	172,480	692,840
	経費(千円/年)	—	30,433	112,031
	単年度収支(千円/年)	—	142,047	580,809
	建設費積算額(千円)	—	386,400	1,764,100
◆環境的便益	単純投資回収年数(年)	—	2.7	3.0
	一次エネルギー削減量(GJ/年)	79,281	397,290	1,397,193
	CO2削減量(t-CO2/年)	4,121	20,619	72,386

ただし、これらの費用便益は、同地区のネットワーク全体のものであり、各主体の意思決定には直接へと繋げるには、ステークホルダーごとの費用便益の構造を見える化することが重要である。そこで、図3.2.15を示すことで、それを明示的に分析した。これまで記述したように化石燃料削減分について、蒸気価格を通じて、熱供給事業者と熱需要事業者で配分することとなる。さらに、その事業化までの取引コストを引き受け、さらに事業時の効率的な運営とリスクをとることで熱管理事業者が参入した場合、その対価として、蒸気の販売額の差額を収益とすることとなる。また、熱管理事業者は、情報技術を用いることでより収益性を高めることが期待される。それをエネルギー情報事業者とする。

この費用便益の構造を分析したうえで、社会実装を促進する場合、主たるステークホルダーである熱供給事業者と熱需要事業者に加え、その相対取引を支援する機能が本研究課題で取り組んでいる中間組織が有することが望ましい。これは、韓国蔚山市での地域EIPセンターが果たす役割である。ここでの分析では、この中間組織が熱管理事業者とエネルギー情報事業者の機能を有すると想定している。産業共生の研究でも、第3者機関の役割が重要になるとの論調が説得力を持ちつつある。例えば、Siskos and Wassenhove (2016)では、相対取引において、財政的な信用確保と2社間での費用、便益、リスクの配分の決定といった役割を持つSynergy Management Services Companiesというビジネスモデルを提唱している²³⁾。韓国蔚山市の事例もそれを支持している。韓国では、地域EIPセンターが中間組織の持つ機能として、熱管理事業者とエネルギー情報管理者の二つを有している。前者は、相対取引を円滑に実施するための取引コストの低減、中立的な蒸気価格設定、コーディネートなどを実施し、事業開始後は、熱供給マッチングを管理することによって収益を得る。そして、その際のIoT/AI、あるいはブロックチェーンを活用した情報システムは、熱管理において付加価値を高めうる。その内容については、現状においては、便益として特定するに十分な実証社会実験ができていないため、計上していない。また、通常、取引コストは、同定することが困難であるため、その削減分も計上していない。ただし、想定される費用としてエネルギーマネジメント設備費とその運営費を計上している。

まず、熱需要事業者の視点で熱ネットワークを記述する。清掃工場などの熱供給事業者と熱需要事業者が相対取引によって、事業化が進む場合、熱需要者は、それまで利用していた化石燃料を利用したボイラーを代替することになるため、熱供給事業者から購入する蒸気価格が化石燃料よりも下回れば、熱需要事業者の光熱費が下げるため、十分に蒸気利用を選択しうる。加えて、清掃工場からの供給蒸気は、温室効果ガス排出原単位は、化石燃料よりも低いため、熱需要者にとっては、メリットが大きい。ただし、清掃工場からの蒸気供給は、停止期間もあるため、エネルギー・セキュリティを検討しておく必要がある。既存のボイラーあるいはコジェネがある場合は、それを保持することが現実的な策となるが、それができない場合、追加的な費用が生じる。このバックアップ設備をどのステークホルダーが保有するのかが、一つの鍵となりうる。バックアップボイラーがない場合、すでに有している熱需要事業者の設備をリースするなどの措置がとられると、地域全体でのコスト削減につながり、ネットワークの強みを発揮できる。この点は、詳細なフィージビリティ調査で検討すべき課題である。

一方、熱供給事業者の視点で記述する。蒸気配管建設のコストを負担しても化石燃料よりも安い、あるいは同程度の価格で販売できるかが鍵となる。また、既に発電施設を有する清掃工場は、発電機等の設備およびその運用費を削減できる可能性がある。蒸気販売により、蒸気配管建設のコストを賄い終え、投資回収できると定期的に収益を上げることができると、蒸気配管建設のコストの負担をできるだけ減らすことが事業化に向けた関心事になる。

このように事業全体の費用便益が明確になると、次に主体間での費用、便益、あるいはリスクの分担方法が推進の鍵となる。そして、本サブテーマでは、社会実装支援組織により、事業化に向けた取引コストを下げ、事業性を担保できる社会システム。制度を分析した。これまでの韓国のベストプラクティス調査と国内の事例調査の結果を踏まえると、熱供給側が配管コストを負担し、熱需要側は構内の熱交換器関連設備を負担するケースが主である。韓国では、配管建設にあたって、地域EIPセンターが中心となり、計画策定、建設JVの形成、許認可の支援など一貫した社会実装支援がなされる。熱供給事業者は、配管建設コストを適切に見積もったうえで、地域EIPセンターの仲介のもと、熱需要者との蒸気価格交渉に臨めるため、需給双方の事業者にとって公平なビジネスモデルを策定しやすい環境が整っている。日本においても、需給マッチングとビジネスモデル構築に向けて地域EIPセンターのような社会実装支援組織は有効だといえる。

一方、国内の事例では、熱供給者が主要な企業（anchor company）であり、すでに十分な信頼を有しているために、熱需要事業者は交渉に参加する障壁が低くなるケースが多い。これは、産業共生研究におけるデンマーク・カルンボの社会学的研究の中で論じられている²⁴⁾。今後の日本において、主要な企業が産業への熱供給事業を展開する可能性は大いにある。現在の日本の熱供給事業の促進政策が配管建設コストへの補助金に偏っていることを鑑みると、こうした企業は、国の予算を用いて詳細なフェージビリティ調査を実施する基盤が十分にあるうえ、配管敷設費用の補助金獲得の際もその信頼力と技術力を発揮する。

しかし、本研究課題で対象としている清掃工場は、主要な企業の役割を担うことは考えづらく、同時に主たる事業が清掃業務であるため、熱需要者との交渉あるいは住民説明に伴う取引コストを支払うことは難しい。本サブテーマでは、国内での地域EIPセンターの創設を提起しているが、その役割を熱管理事業者及びエネルギー情報管理者に分けて記述する。地域EIPセンターは、第3者の熱管理事業者として、熱需給事業者の相対取引を仲介することで、より取引コストを下げ、付加価値を生み出す可能性が高い。加えて、地域EIPセンターは、エネルギー情報管理者の機能を有することも期待できる。今後のIoTとAIの発展によって、地域の天候や再生可能エネルギーの供給状況に合わせて、熱需給を最適にマネジメントでき、これまでの蒸気融通事業よりも高い便益を期待できるためである。しかし、これらの事業者が生み出す付加価値について定量的に推計することはできなかった。情報技術が高度な熱利用にどれだけ便益をもたらすことができるかは、今後の非常に重要な研究課題になるため、引き続き検討していく。

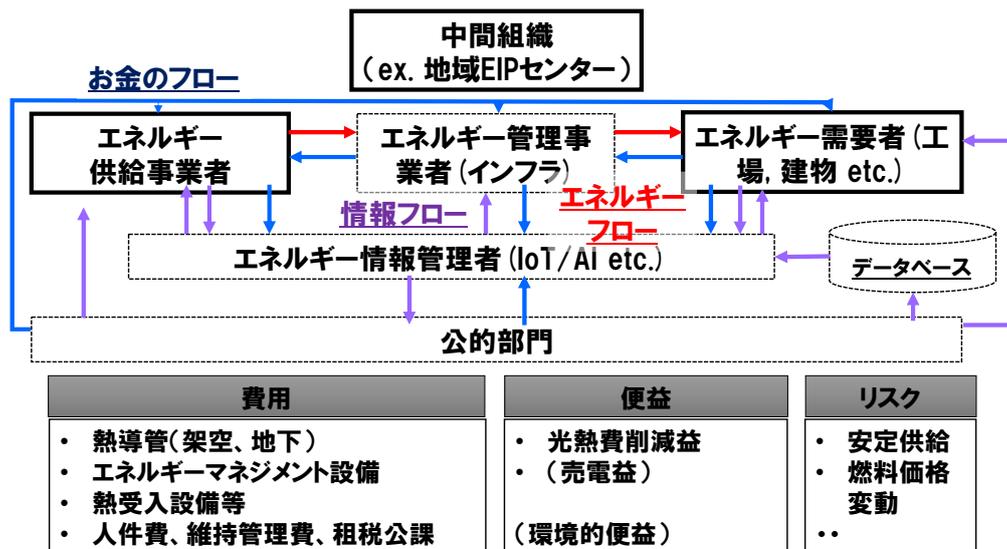


図3.2.15 主体ごとの費用便益分析を実施するためのフレームワーク

2) 産業利用に向けた社会実装支援の検討

北九州市において検討した「北九州版地域EIPセンター（仮）」の設立に向けた要件を国内の廃棄物

行政と絡めて論じる。これは、特定地域の社会実装の支援の具体策であるが、国内の他地域へも水平展開が可能な要件が多く、将来的には国の政策として、地域EIPセンターに類する組織の創設とそのネットワーク化による知見と経験の蓄積が重要な論点となりうる。

まず、地域において熱利用ネットワークを形成していくためには、地道な普及啓発（Awareness Raising）と能力醸成（Capacity Building）を実施する機能が求められる。国内の清掃工場の立場で見ると、現在のところ、焼却熱の工場利用の事例はほとんどなく、コンセプト自体が普及しておらず選択肢に上がることは少ない。韓国でも、EIP計画が出された2005年当時は、同様の状況であったが、KICOX及び地域EIPセンターが地道な普及啓発（Awareness Raising）と能力醸成（Capacity Building）を実施してきた経緯がある。EIP事業全般、あるいは焼却熱の工場利用に絞るのであれば、清掃工場の管理者や技術提案するコンサルティング会社やメーカーの担当者、地域の研究者に対し、積極的に情報発信し、意見交換の場を提供していく必要がある。韓国の例では、KICOXという国の外郭団体がその役割を担ったが、国内では、まずは地域EIPセンターがそれぞれの地域で活動すること、さらには国レベルで実施するネットワークを形成することで、具体的な情報発信機能と実務者等の人材育成機会の創出をしていくことが長い意味で持続的な普及につながる。

「北九州版地域EIPセンター（仮）」の具体的な法人の設計も重要な論点である。工場間の蒸気融通事業は、工場のユーティリティマネジメントを改変することであり、事業者にとって大きな意思決定となる。これまでの国内事例では、産業団地内の連絡組織といった組合等において、他事業者のエネルギー需給の状況を知る一つの契機となるが多かった。しかし、その後、2社間の相対取引で実際の契約に結びつくまでには、第三者団体が関与することはなく、多大な取引コストがかかる。その点は、カルンボーの事例でも指摘されており、Key personの存在とその信頼が欠かせないため、事業化自体が属人的になるという課題がある²⁴⁾。本研究課題では、「産業スマートエネルギーシェアリング研究会」での議論を通じ、国内の場合、前述のアンカー企業に頼るケースを除くと、事業運営に一定の公的資金を用いる特定目的会社（SPC）の立ち上げが現実的との結論に至った。その際に、どの企業が主体になるか、が課題になる。候補となるのは、地域エネルギー会社、産業団地のディベロッパー、地域管理事業者である。3者の内のいずれかが筆頭の株主になり、残りの2者に加えて、自治体、熱供給事業者、熱需要事業者、エネルギー情報管理者が株主となる体制を検討している。研究者も外部アドバイザーとしてかわり、学術的な助言をするほか、韓国などベストプラクティスとの連携や今後需要が見込まれる途上国との国際協力で貢献する予定である。

また、地域EIPセンターには、②の費用便益分析をし、より詳細なフィージビリティ分析、ビジネスプランの創出できる情報、機能と人材の蓄積が欠かせない。従業員は、蔚山市の事例では、産業団地のベテラン技術者が重要な役割を果たしていることもあり、参考にできる部分が多い。すでにエネルギー関連の技術力を有する人材は、社会実装の成功に欠かせず、その成功例が出てくると、組織の信頼性も増し、今後の展開も検討しやすくなる。清掃工場を熱供給事業者として参画を促す場合にも、組織の信頼性をもって、交渉に臨める点は、大きな強みとなる。さらに、熱融通事業の1つの事業で完結せず、ネットワークとして発展していくことを考慮すると、法人格を持った地域EIPセンターによる継続的な取り組みが重要となる。

同時に、清掃工場側へのアプローチも整理する。清掃工場の低コスト化は、財政難に直面している自治体にとって切実な課題である。地域EIPセンターは、清掃工場の外へ蒸気を供給する配管の敷設の負担を、蒸気販売で賄うことが可能であるとの認知度とそのリスクを軽減する仕組みを持つ必要がある。これまでの発電を中心としたエネルギー回収は、FITによる増収よりも一定量のエネルギー回収効率を確保することで、交付金の獲得し、初期コストの低減することに主眼が置かれてきた。さらに、現状では、熱供給を検討する際、配管敷設コストを下げるために、熱利用を促進するための他の補助事業に申請することを目指すことが多いが、それは、交付金と他の補助金の獲得の両方に申請する必要があり、行政コストが高くなる可能性が高い。さらに、国内の熱利用に関する補助金は、環境省、経済産業省、国土交通省、総務省、農林水産省が個別に実施しているうえ、採用されるには技術的先進性が求められるため、検討をためらう要因になっている。

韓国の実態調査からの示唆は、清掃工場が低コスト化を進める手段として、先進事例への初期投資の補助ではなく、地域特性に応じたビジネスモデルを構築することに資金と人的資源を投入する方法が有効である点にある。したがって、先進事例への補助事業の一部を削減し、その資金と人的資源を事業機会の特定、FS調査に投入し、補助金なしで事業化できるビジネスモデルを創出することに注ぎ、そのノウハウの蓄積に政策を転換していく必要もでてくる。工場への熱供給事業は、初期費用として配管敷設コストがかかるが、収益性が高いビジネスモデルとなりうるため、地域特性等の条件がそろえば、低コスト化につながる。実際に、蔚山市の事例では、蔚山広域区が蒸気収入による利益を享受することで、財政負担を減らせたことで納税者への説明を果たしている。総じて、地域EIPセンターなどを利用し、焼却熱の産業利用を普及させることは、国内の廃棄物セクターの費用削減に貢献しうる。

なお、北九州市は、この点をすでに先行的に検討開始している。「産業スマートエネルギーシェアリング研究会」における産業団地での議論を水平展開させ、市街地の清掃工場と隣接する企業間での焼却熱融通事業の検討を始めている。そして、本研究課題メンバーでそのサポートをしている。現在では、需給マッチングの検討の段階であるが、本研究課題を通じて、社会実装までに必要な要件は明確になっているため、熱供給事業者である清掃工場と熱需要者である工場管理者および経営主体の意思決定を促す支援を実施していく。この活動は、「産業スマートエネルギーシェアリング研究会」内でも位置付けられており、2020年度にフィージビリティ調査の実施に向けて準備が進んでいる。こうした社会実装の芽が出てくるのも、本研究課題での情報発信と知見の蓄積の成果であり、このような機能を有する地域EIPセンターの創設は有効といえる。

また、「北九州版地域EIPセンター（仮）」では、情報技術の活用も検討課題として挙げている。この課題は、韓国においても議論を開始したばかりである。「産業スマートエネルギーシェアリング研究会」では、事業性を高めることが見込まれるいくつかの論点で検討を開始している。まず、産業系のIoT(Internet of Things)の発展から、これまで障壁であった熱需給の事業者を情報管理・共有の処理コストが大幅に下げることが可能になる。情報の規格化をするだけでも、複数の業種、工場のエネルギーマネジメントが効率化できる。さらに、太陽光や風力発電などの再生可能エネルギーの時間変動を加味した電気・熱需給の最適制御といった発展的な研究開発、事業化へともつながる。熱融通事業で後発の日本でも、初期段階から情報技術の活用を考慮することで、より高度な地域エネルギーネットワーク構築の基盤をつくれる可能性が高い。

さらに、地域EIPセンター自体の長期的な収益構造も見据えておく必要がある。韓国のEIP計画は、2016年で一区切りを迎え、2017年以降は新しい体制での取組が開始した。地域EIPセンターは、EID(Eco Industrial Development)センターと名称を変え、より独立した非営利の民間企業として、EIP事業の更なる促進のためのビジネスを実施している。これは、KICOXは、地域EIPセンターに十分なノウハウが蓄積され、EIDセンターとして事業を推進することが出来ると判断したためである。KICOX及びKNPCは、それぞれ、設備のレンタル及び共用設備の管理、各EIDセンターの管理及び共通のEIPプラットフォームの構築、という役割に移行している。また、学術面でも円滑な事業化に向けたツールとして、ビジネスモデルキャンパス、研究開発(R&D)から研究開発の事業化(R&DB)への発展、イノベーションの推進プロセスの体系化などで支援する準備を進めている。これらの動きを踏まえ、現在のEIP事業では、それぞれ対し特別目的会社を設立し、そこで得られた収益は参加企業の収益となり、またその一部はEIDセンターに支払われる形となっている。引き続き、MOTIE及び地方自治体から提供される資金もあるが、より独立して収益を上げることを目標としている。韓国の場合、地域EIPセンターという中間組織が、ビジネス感覚を有して活動していることが、公的セクターである一般廃棄物の焼却炉が工場に蒸気を搬送する事業を成立させる社会インフラとなっている。この考察を踏まえ、「北九州版地域EIPセンター（仮）」も特別目的会社の設立目的を拡張し、組織の持続的な経営が可能な形態となることが望まれる。

以上、北九州市での社会実装支援について論じた。ここでの経験と知見は、他地域での検討にも普及しつつある。人口2万人程度の小規模自治体において、前述の(3)のインターフェースを通じて意見交換、簡易フィージビリティを実施した。現在、広域化による統廃合を検討している地域で、近隣自

治体および県担当者とも意見交換をしている。人口15万程度の中規模自治体においては、産業団地と近接している清掃工場の更新に合わせて計画支援をしている。大規模な工業団地の有する自治体でも同様に焼却熱の産業利用への関心が高まりを受け、本研究課題メンバーが検討に参加し、事業化に向けて予算化を目指している。このように本研究課題での検討と発信は、国内で焼却熱の産業利用の事業化に向けた機運を高めることに一役買っている。この実績をさらに信頼へと変え、より実行力を高めていくためには、事業化までを一貫してサポートし、経験と知見を蓄積する社会実装支援の枠組みが極めて重要である。本研究課題の成果を土台とし、特定地域の地域EIPセンターを展開し、日本の実情に合わせて水平展開する支援組織を構築していくことが今後の研究課題であり、政策課題である。

3) 江東区、中央区における地域エネルギーの費用便益分析

地域エネルギーモデルを用いた東京都江東区、中央区のシミュレーションの結果を図3.2.16に示す。清掃工場からの低温排熱利用は、導管コストおよび熱搬送コストの高さゆえに、総コストでは導入コストが最も高い技術になっている。一方、導入に伴う燃料消費削減を加味すると、ベースラインケースと比較して5~7%の削減率を達成できている。下水処理場からの廃熱、風力発電より費用便益の視点からは優位にある。一方で、中央区のような業務ビルの密集地で周辺に河川がある地域では、地中熱と河川熱の効果が高い結果となった。

今回のモデル構築および特定地域でのシミュレーションは、地域特性に応じた地域エネルギーシステムの設計に有用なツールとなりうる。ただし、デンマークのように公的機関が技術変数や将来のコスト情報などを統一して公表するなど分析の想定と結果に妥当性を持たせていくことが課題である。そのうえで、こうしたモデルとシミュレーションツールがウェブ上で利用できるようにすることで、清掃工場の低温排熱など投資回収年が長いビジネスモデルの検討に役立てていくが必要となる。

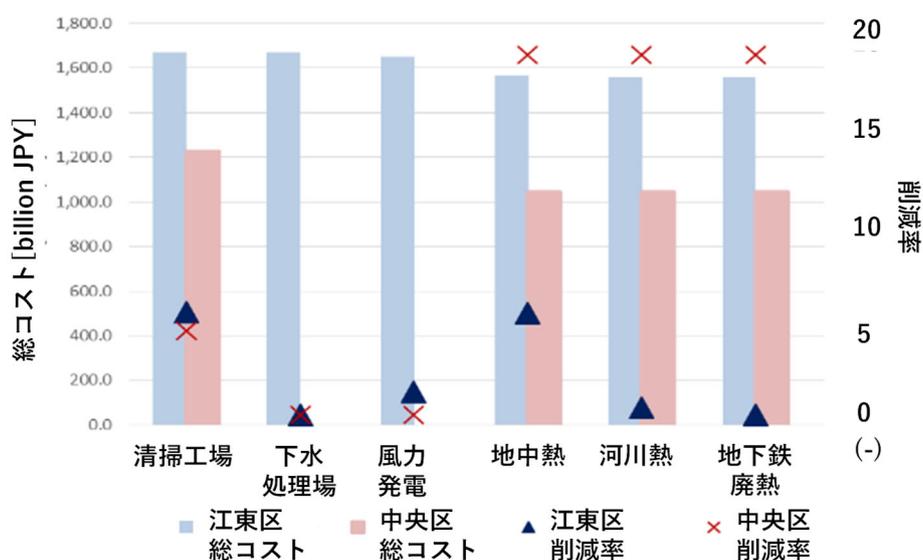


図3.2.16 地域エネルギーモデルのシミュレーション結果（江東区、中央区）

4) 低温排熱の民生利用の社会実装に向けた検討

低温排熱の民生利用については、公共デザイン、地域エネルギー計画の専門家と連携し、「共創による持続可能な地域づくりのための20のパターン」を冊子化し、今後の研究展開のたたき台を作成した。本冊子は、地域エネルギー計画を伴うまちづくりにおいて、公共性向上を目指す指南を示すものである。グッドプラクティスに特徴的に現れる要素を見出し、「パターン」としてとりまとめた。「パターン」とは、繰り返し発生する課題に対して実践されてきた課題解決のアイデアを文書化したものである。具体的には、「大きな方針/ヴィジョン」、「小さな実践と報酬」、「首長による先導」、「庁内の意識統一」、「質の高い調査・研究」、「資金の流れの見える化」、「地域の強みを活かす」、「視

野を広げる視察」、「地域とのコミュニケーション」、「自治体も輪の中のひとつに」、「萌芽的な活動を育てる」、「コミュニケーションの場づくり」、「地域全体の中心」、「みんなに承認された柔軟な基本計画」、「ポリティカルリスクの回避」、「スピード感を持った意思決定のための庁内体制」、「エージェント」、「専門家会議」、「施設整備の順番」、「成果の発信」の20をもとに計画の立案プロセスに留まらず、地域を実効的に動かしていく「パターン」を記述している。30～40年という長い投資回収を想定した事業の実施では、こうした共創による熱利用が有効である。さらに、サブテーマ3で明らかにした武蔵野市の合意形成の過程からわかるように、社会実装に向けては計画段階から多くの労力と時間を有する。本研究課題の知見がこれから清掃工場の改良や更新を計画立案する地域において、清掃工場を価値ある地域の社会インフラとして位置付けられるツールへと深化させることが課題となる。

4.5 政策影響シミュレーション

政策影響シミュレーションの結果を図3.2.17に示す。まず、FIT制度がある現在では、現状施設での基幹改良により発電施設を高効率化する技術シナリオS2-IncMAX-FITで純費用便益86,366百万円/年になる。そして、現状施設で熱利用を事業化する技術シナリオS3-SE-FITで純費用便益87,242百万円/年になる。いずれの場合も現状の純費用便益115,709百万円/年と比較して24.5%程度の費用削減につながる。もちろん、その施設の寿命や減価償却の返却などが関連し、一概には比較できないが、清掃工場において収益を見込んだ計画を立てることが重要であるといえる。一方、広域化計画を進める場合、収集・運搬費用が、現状立地の77,890百万円/年から107,875百万円/年まで増加するが、今回の算定の仮定では施設規模を現状維持としたため、建設費用が現状と同程度になっている。実際は、人口減少を見込んだ施設規模の縮小が現実的なので、広域化のメリットが提示されるはずであり、モデルの改良が課題である。また、愛知県においては、もともとの施設規模が150トン/日より小さい清掃工場が7施設（41施設中）、平均226トン/日であり広域化せずとも高い発電効率、売電収入を見込める施設が多いため、現状立地と広域化で売電益に大きな差が出なかった。

次に、熱利用について記述する。熱販売収入は、43,415百万円/年と売電益の2.4倍程度となった。立地特性に大きく依拠する熱需要量、すなわち蒸気販売収入と配管費用は、工業団地への立地など思い切ったシナリオを提示することで、さらに純費用便益が下がるため、清掃工場における高度な熱利用を進める大きなインセンティブとなる。次にFIT政策が終了し、売電価格へのプレミアムがなくなった場合の算定結果を記述する。現状施設での基幹改良により発電施設を高効率化する技術シナリオで純費用便益97,187百万円/年になる。そのため、現状施設で熱利用を事業化する技術シナリオで純費用便益87,242百万円/年と比較して、純費用便益が11.4%低い。国のエネルギー政策が特に再生可能電力に注力することは、一方で高度な熱利用のような事業性の高い政策的な選択肢を不利な状況にしているともいえる。

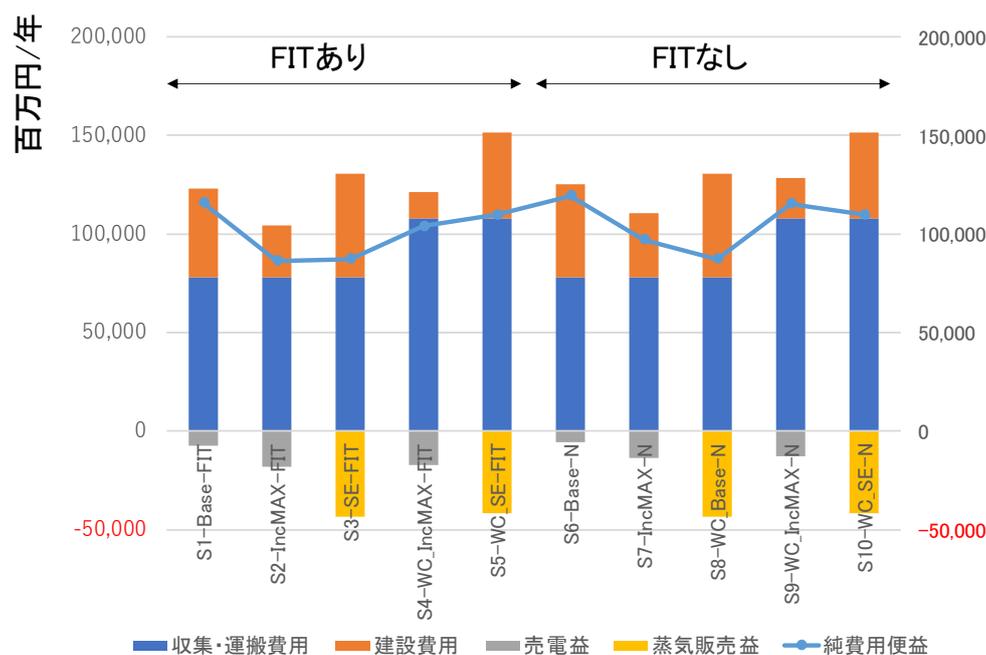


図3.2.17 政策影響シミュレーションでの純費用便益分析の結果

続いて、スケジューリングモデルの結果を表3.2.12に示す。第5期、すなわち2017～2022年度までの各清掃工場の選択をFIT政策がある状況の結果である。現状立地で発電最大化を選択した工場が6か所、現状立地で、現状から熱利用へと選択を変えた工場が11か所、すぐに熱利用を選択した工場が12か所、広域化して発電最大化を選択した工場が3か所、それに合わせて残りの8か所が廃棄を選択した。S2-IncMAX-FITは、比較的早く、中規模の工場が選択する傾向がある。一方、S3-SE-FITは、比較的新しく、大規模の工場が選択する傾向があった。これは、古く、中規模の工場は、フロンティアライン分析の効率向上がより顕著になり、純費用便益の減少につながっているためである。一方、大規模な工場は、すでに高効率の発電設備を有しているため、発電最大化による純費用便益の減少が期待できないが、大規模な工場は、熱需要先と近接していることがあるため、熱利用を選択する傾向を取ったといえる。今回は、広域化を選択したのは、3つの広域化ブロックであった。これは、前述の通り、広域化に伴う施設規模の縮小を考慮できていなかったためと考えられる。

本サブテーマで構築したモデルは、清掃工場における高度な熱利用を扱ううえで、純費用便益分析の結果をもとに時系列の意思決定を最適化モデルとして分析することを意図した。その中で、広域化ブロックの同時の意思決定を表現するなど長期の政策影響シナリオをシミュレーションするうえで、新たな学術的な試みといえる。しかし、課題も残っている。まず、意思決定を判断する期間が短期に集中している。これは、法定寿命である15年をモデル内での寿命と設定したため、多くの清掃工場が短期での選択をせざるをえない制約条件であったこと、清掃工場の経年劣化や減価償却の検討をモデルに組み込めなかったことに由来する。また、将来的な人口動態やライフスタイルの要素を組み込んだシナリオ作成に対応できるかを確認できなかった。今後、時系列の検討をモデルに組み込んだうえで、純費用便益分析において多種多様なシナリオを作成し、その結果をもとにスケジューリングモデルを用いた分析することで、高度な地域熱利用に向けた長期の政策影響を検討するツールとなりうる。

表3.2.11 スケジューリングモデルの結果

	1期	2期	3期	4期	5期
工場 1	廃棄	廃棄	廃棄	廃棄	廃棄
工場 2	廃棄	廃棄	廃棄	廃棄	廃棄
工場 3	発電最大化	発電最大化	発電最大化	発電最大化	発電最大化
工場 4	廃棄	廃棄	廃棄	廃棄	廃棄
工場 5	廃棄	廃棄	廃棄	廃棄	廃棄
工場 6	現状	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用
工場 7	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用
工場 8	発電最大化	発電最大化	発電最大化	発電最大化	発電最大化
工場 9	発電最大化	発電最大化	発電最大化	発電最大化	発電最大化
工場 10	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用
工場 11	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用
工場 12	廃棄	廃棄	廃棄	廃棄	廃棄
工場 13	発電最大化	発電最大化	発電最大化	発電最大化	発電最大化
工場 14	現状	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用
工場 15	広域発電最大化	広域発電最大化	広域発電最大化	広域発電最大化	広域発電最大化
工場 16	廃棄	廃棄	廃棄	廃棄	廃棄
工場 17	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用
工場 18	発電最大化	発電最大化	発電最大化	発電最大化	発電最大化
工場 19	現状	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用
工場 20	廃棄	廃棄	廃棄	廃棄	廃棄
工場 21	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用
工場 22	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用
工場 23	現状	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用
工場 24	広域発電最大化	広域発電最大化	広域発電最大化	広域発電最大化	広域発電最大化
工場 25	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用
工場 26	現状	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用
工場 27	現状	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用
工場 28	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用
工場 29	発電最大化	発電最大化	発電最大化	発電最大化	発電最大化
工場 30	現状	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用
工場 31	現状	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用
工場 32	現状	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用
工場 33	現状	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用
工場 34	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用
工場 35	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用
工場 36	広域発電最大化	広域発電最大化	広域発電最大化	広域発電最大化	広域発電最大化
工場 37	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用
工場 38	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用
工場 39	廃棄	廃棄	廃棄	廃棄	廃棄
工場 40	現状	発電最大化	発電最大化	発電最大化	発電最大化
工場 41	現状	熱利用	熱利用	熱利用	熱利用

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- これまで別々に進んできた産業共生 (Industrial Symbiosis)、廃棄物からのエネルギー回収 (Waste to Energy)、地域熱供給 (District heating & Cooling)の社会インフラ・制度を統合的に研究するフレームワークを構築した。
- 国際的なベストプラクティスを調査し、国内における廃棄物からの高度な地域熱利用の阻害要因とその緩和策を抽出した。焼却熱の産業利用と低温排熱の民生利用では、大きく事業の成立要因が異なることから、各々の政策を講じ、ビジネスモデルを研究することの重要性を明らかにした。
- 主たるステークホルダーとなる一般廃棄物の清掃工場について、インターフェースを構築して実態調査を実施するとともに、地域特性データベースを構築し、地域特性別の政策立案をする基盤を提示した。
- 北九州市において熱利用ネットワーク費用便益分析と社会実装支援を実施し、社会実装支援組織としての地域EIPセンターの機能を国内で設立する検討に発展した。
- 愛知県を対象に政策影響シミュレーションを実施し、広域化計画など廃棄物政策とエネルギー政策、都市計画の関連を踏まえた検討をした。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

「特に記載すべき事項はない。」

<行政が活用することが見込まれる成果>

- 廃棄物からの高度な熱利用が国内で進まない要因および海外のベストプラクティスからの緩和策は、国内事情と先進事例を踏まえた効果的な政策の検討に貢献できる可能性がある。
- 焼却熱の産業利用は、採算性が高いためビジネスモデルの構築支援による推進する可能性がある。成果の一つである韓国の地域EIPセンターの調査と国内での設立に向けた検討は、廃棄物からの高度な熱利用に向けた政策づくりに役立つ可能性がある。
- 一般廃棄物の清掃工場の熱利用に関する選好調査の結果は、基礎データとして政策の検討に貢献できる可能性がある。
- 地域特性データベースおよびそれを用いた政策シミュレーションは、広域化政策、エネルギー政策を総合的に検討できるツールとなる可能性がある。
- 特定地域での費用便益分析は、焼却熱の産業利用の利益構造を明らかにしており、公正な事業者間の契約策定に向けた政策づくりに貢献できる可能性がある。

6. 国際共同研究等の状況

サブテーマリーダーの大西悟は、国際連合産業開発機構 (UNIDO) 内のInternational EIP Centerの立ち上げ式及びワークショップにinternational expertとして参加するなど、エコ・インダストリアル・パーク研究に関する国際共同研究に参画している。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり) >

- 1) M. Fujii, Y. Dou, Lu. Sun, S. Ohnishi, S. Maki, H. Dong, L. Dong and R. Chandran: Resources, Conservation & Recycling, 149:586-594 (2019) Contribution to a low-carbon

society from improving exergy of waste-to-energy system by upgrading utilization of waste

- 2) 牧誠也, 大西悟, 藤井実, 後藤尚弘, 五味馨: 廃棄物資源循環学会論文誌, 30:153-165 (2019)
地域特性を考慮した収集運搬による費用・CO2 排出量推計のための修正グリッドシティモデルの開発
-愛知県を対象としたケーススタディ-

<査読付論文に準ずる成果発表>

「特に記載すべき事項はない。」

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 大西悟: 特集号No. 4 廃棄物の熱エネルギー利用の高度化にむけて, 廃棄物資源循環誌, Vol. 30, No. 4, pp. 270-276 (2019) 韓国・地域EIPセンターが促す焼却熱の工場利用の実態

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) L. Sun, M. Fujii, S. Maki, S. Ohnishi, Y. Dou, 14th Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems (SDEWES) conference (2019) Energy saving and environmental benefit of waste-to-energy transition in China
- 2) 牧誠也, 大西悟, 藤井実, 後藤尚弘, 第38回エネルギー・資源学会研究発表会 (2019) 産業熱需要賦存量の空間分布推計法の開発及び清掃工場からの熱供給可能性の検討: 愛知県におけるケーススタディ
- 3) M. Fujii, T. Okadera, N. Goto, S. Ohnishi, S. Maki, L. Sun, The 14th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES) (2019) Possibility to Building Smart Energy Sharing Network in an Industrial Park Through the Information Sharing
- 4) M. Fujii, S. Ohnishi, Y. Dou, L. Sun, L. Dong, the 10th International Conference of the International Society for Industrial Ecology (2019) Industrial Smart Energy Sharing for promoting de-carbonized industrial park
- 5) 大西悟, 「第4世代地域熱供給フォーラム」(4DHフォーラム)第4回研究会 (2019) 焼却熱利用を機とした地域熱供給の推進~制度設計と公共デザインとの連携の側面から~
- 6) N. Goto, S. Ohnishi, and M. Fujii, the 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management (2019) Study on Location of Solid Waste Incineration Plant with New Energy Recover Facility in Japan
- 7) S. Ohnishi, International EIP Expert Conference for Commemoration of Establishment of 'UNIDO International Center for Eco-Industrial Park Development', Ulsan University, Korea (2019) IS Business Cases in Kitakyushu, Japan
- 8) S. Ohnishi, International EIP Expert Conference for Commemoration of Establishment of 'UNIDO International Center for Eco-Industrial Park Development', Ulsan University, Korea (2019) Japan-Indonesia EIP Program
- 9) S. Ohnishi, International symposium for Circular Economy in Asian city, Shanghai jiao-ton university (2019) strategic transition management to circular economy with waste management planning
- 10) 中山 志穂, 森 俊介, 大西 悟; 中央区及び江東区における未利用エネルギーを含む地域細分化エネルギーマネジメントシステムモデルの構築と評価, 第34回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 2018年1月25日~26日
- 11) Shunsuke Mori, Yasutomo Tejima, Shiho Nakayama, Satoshi Ohnishi; An Assessment of Unutilized Heat Sources and Distributed Energy Technologies by an Energy Network

Model with 151 Subregions of Tokyo Koto Area, 15th IAEE European Conference 2017, 2017年9月3日～6日

- 12) Saki Yokohama, Utomo Sarjono Putro, Satoshi Ohnishi, Shunsuke Mori ; An Energy-Economy Model for Indonesia Considering Inter-Regional Energy Resources Transportation and Daily Demand Changes, 2017 3rd International Conference on Environment and Renewable Energy, 2017年2月25日～27日

(3) 知的財産権

「特に記載すべき事項はない。」

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

「特に記載すべき事項はない。」

(5) マスコミ等への公表・報道等

「特に記載すべき事項はない。」

(6) その他

「特に記載すべき事項はない。」

8. 引用文献

- 1) Chertow, M. : Uncovering” industrial symbiosis, Journal of industrial Ecology 11.1: 11-30, 2007
- 2) Van Berkel, R., Fujita, T., Hashimoto, S., & Geng, Y. Industrial and urban symbiosis in Japan: Analysis of the Eco-Town program 1997-2006, Journal of Environmental Management, 90(3), 1544-1556, 2009
- 3) Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F., & Mathiesen, B. V. :4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. Energy, 68, 1-11, 2014
- 4) IEA, Status of Power System Transformation 2019, 2019, <https://www.iea.org/reports/status-of-power-system-transformation-2019>, access to 2020/5/22
- 5) Kemp, R., Barteková, E., & Türkeli, S.: The innovation trajectory of eco-cement in the Netherlands: a co-evolution analysis. International Economics and Economic Policy, 14(3), 409-429, 2017
- 6) Werner, S.: International review of district heating and cooling. Energy, 137, 617-631, 2017
- 7) 一般社団法人 日本熱供給事業協会: 熱供給事業便覧 平成30年版, 2018
- 8) Behera, S. K., Lee, S. Y., Kim, Suh, S., Park H. S.: Evolution of ‘designed’ industrial symbiosis networks in the Ulsan Eco-industrial Park: ‘research and development into business’ as the enabling framework. Journal of Cleaner Production, 29, 103-112, 2012
- 9) Park, J., Park, H. S.: Securing a Competitive Advantage Through Industrial Symbiosis Development, Journal of Industrial Ecology, Vol. 18, Issue 5, pp. 677-683, 2014
- 10) Nielsen, J. H.: Denmark’s energy future. Energy policy, 18(1), 80-85, 1990
- 11) 中山 志穂, 森 俊介, 大西 悟 ; 中央区及び江東区における未利用エネルギーを含む地域細分化エネルギーマネジメントシステムモデルの構築と評価, 第34回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 2018年1月25日～26日

- 12) Shunsuke Mori, Yasutomo Tejima, Shiho Nakayama, Satoshi Ohnishi ; An Assessment of Unutilized Heat Sources and Distributed Energy Technologies by an Energy Network Model with 151 Subregions of Tokyo Koto Area, 15th IAEE European Conference 2017, 2017年9月3日～6日
- 13) ゼンリン, 建物ポイントデータ 江東区 (2017年度版)、中央区 (2017年度版)
- 14) Ohnishi, S., Fujii, M., Ohata, M., Rokuta, I., & Fujita, T. (2018). Efficient energy recovery through a combination of waste-to-energy systems for a low-carbon city. *Resources, Conservation and Recycling*, 128, 394-405.
- 15) Fujii, M., Fujita, T., Chen, X., Ohnishi, S., & Yamaguchi, N. (2012). Smart recycling of organic solid wastes in an environmentally sustainable society. *Resources, Conservation and Recycling*, 63, 1-8.
- 16) Dou, Y., Ohnishi, S., Fujii, M., Togawa, T., Fujita, T., Tanikawa, H., & Dong, L. (2018). Feasibility of developing heat exchange network between incineration facilities and industries in cities: Case of Tokyo Metropolitan Area. *Journal of cleaner production*, 170, 548-558.
- 17) Park, J., Park. J. M., Park H. S.: Scaling - Up of Industrial Symbiosis in the Korean National Eco - Industrial Park Program: Examining Its Evolution over the 10 Years between 2005-2014. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), pp. 197-207, 2019
- 18) 大西悟: 韓国・地域EIPセンターが促す焼却熱の工場利用の実態, 特集号 No. 4 廃棄物の熱エネルギー利用の高度化にむけて, 廃棄物資源循環誌, Vol. 30, No. 4, pp.270-276, 2019
- 19) Chittum, A., & Østergaard, P. A.: How Danish communal heat planning empowers municipalities and benefits individual consumers. *Energy Policy*, 74, 465-474, 2014
- 20) The Energymaps.eu website is developed by the Research Group of Sustainable Energy Planning from Department of Development and Planning at Aalborg University. <http://maps.plan.aau.dk/maps/DKfieHA.php>, (accessed 22th, November 2018)
- 21) Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B. V., Werner, S., Möller, B., Persson, U., ... & Nielsen, S. Heat Roadmap Europe: Combining district heating with heat savings to decarbonise the EU energy system. *Energy policy*, 65, 475-489. 2014
- 22) EnergyPLAN has been developed and expanded on a continuous basis since 1999 at Aalborg University, Denmark <https://www.energyplan.eu/othertools/national/energyplan/> (accessed 10th, May 2020)
- 23) Siskos, I., & Van Wassenhove, L. N.: Synergy management services companies: A new business model for industrial park operators. *Journal of Industrial Ecology*, 21(4), 802-814, 2017
- 24) Chertow, M.: "Uncovering" industrial symbiosis. *Journal of industrial Ecology*, 11(1), 11-30., 2007

II-3 人口分布と産業分布を踏まえた焼却施設等の最適立地

東洋大学情報連携学部

後藤尚弘

平成29年度～令和元年度研究経費（累計額）：4,399千円（研究経費は間接経費を含む）
（平成29年度：1,443千円、平成30年度：1,513千円、令和元年度：1,443千円）

〔要旨〕

高度熱利用施設を備えた廃棄物焼却施設の導入計画を立案するために、人口分布による廃棄物発生分布と産業分布による工場熱需要の分布を踏まえた熱需要・熱供給を推計し、両者をマッチングするモデルを開発した。また、熱供給による利潤を推計する手法も開発した。本モデルを愛知県に適用し、同地域の施設導入の可能性について評価を行った。また、現状の焼却施設の立地で製造工場への蒸気供給が可能な焼却施設数を全国規模で把握するため、工業団地・工業用地に立地する廃棄物焼却施設を抽出した。全国で175の一般廃棄物焼却施設が工業団地・工業用地に立地しているなど、現状の配置でも製造工場への蒸気供給が可能な施設も相当数存在することも明らかとなった。しかし、蒸気利用を拡大するには、焼却施設を製造工場や工業団地の近くに新設または移転できることが望ましいが、それには住民の合意が重要な要素となる。焼却施設建設に対する意識調査を実施したところ、焼却施設から安価なエネルギー供給を受けられるなら近隣に焼却施設を受け入れてもよいとの結果も一定数見られるなど、地域に役立つエネルギー供給施設となることの重要性が示唆された。施設立地における地域住民合意の手続きについても、考察を行った。

〔キーワード〕

焼却施設、立地、需給マッチング、住民合意

1. はじめに

廃棄物分野において、エネルギー回収・利用やその高度化は、地球温暖化対策の一つとして有力視され、効率的なエネルギー回収を行う必要性が強まっている。特に、清掃工場で焼却された熱を産業等の需要セクターへ供給する方法がエネルギー効率の面から効率が高いと予測される。しかし、行政側・産業側双方の認知不足から、一施設における高効率化にとどまっているのが現状である。この原因には、その有用性が検討されてこなかったことにあるため、清掃工場からの熱供給ポテンシャルを推計し、その有用性を評価することが必要である。そこで本研究では、愛知県を対象に工業統計メッシュで示される各産業の製造品出荷額及び清掃工場までの距離を用いてメッシュ単位で蒸気供給の可能性を評価することとした。また、Data envelopment Analysisを適用し熱供給事業の効率性を分析することで清掃工場からの熱供給事業のターゲットとして相応しいメッシュを探索する分類ルールの開発を行った。更に全国規模で、現状において焼却施設が工業団地や工業用地にどの程度立地しているかを把握することも重要である。更に、焼却施設からの蒸気供給を今後増大させるには、焼却施設の熱需要近くで新設、または移転することが望ましいが、迷惑施設でもある焼却施設については、住民の合意や自治体のサポートも重要な要素となる。これらの課題について答える調査研究を実施した。

2. 研究開発目的

人口減少や廃棄物処理の効率化の要請から、廃棄物処理施設の広域化が検討されている。既存の広域化計画も踏まえて、焼却施設から製造工場への蒸気供給を核とする地域熱利用について、熱需給のマッチングによる適地の推計が可能なモデルを構築し、愛知県をケーススタディ地域として、広域化の有無別等の将来計画の違いによる、焼却施設から産業への蒸気供給ポテンシャルを推計し、費用対効果のシミュレーションから、対策の社会実装に資する知見を提供する。加えて、地理情報システムによる全

国での焼却熱の産業利用の適地推計を行い、焼却施設建設に対する意識調査と住民合意を踏まえた上で、効率的なエネルギー回収を実現するための、焼却施設等の最適立地やそれに資する政策等の提案を行うことを目的とする。

3. 研究開発方法

3.1 熱需給のマッチングによる適地の推計

熱供給可能な焼却炉・工場の組み合わせを抽出し、熱交換ポテンシャルを推計するために、以下の3点について評価するモデル開発を行った。

- 廃棄物の発生地ごとの組成の違い・収集範囲による熱量への影響
- 処理施設の規模による熱供給可能量の推定
- 産業立地による熱需要量の地理的推定

3.1.1 廃棄物の発生地ごとの組成の違い・収集範囲による熱量への影響

廃棄物の発生場所から処理施設までの輸送を定式化するモデルにGrid City Modelというモデルがある。同モデルは多く利用されているが、いくつかの問題点が指摘されている。そこで同Grid City Modelを改良し、簡易に計算できるようにした修正Grid City Modelを開発した(図3.3.1)。これによりGISの仕様で、地域特性を考慮でき、広域の廃棄物管理計画に活用することが可能となった。

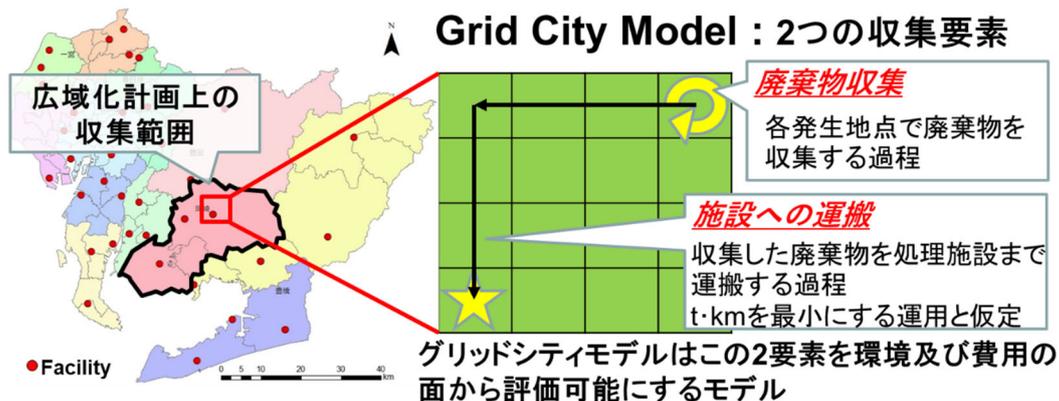


図3.3.1 Grid City Modelの概略

修正Grid City Modelの特徴は以下の通りである(図3.3.2)。

- 対象地における施設情報や人口分布等の地理情報・統計情報を収集する。
- 収集した地理情報・統計情報をもとに、各地の廃棄物発生量をいずれかの施設で処理しなければならないという制約を課した輸送トンキロ最小化問題を作成する。
- 輸送トンキロ最小化問題を解くことで推計された必要トリップ数と距離から、労働時間給、燃料費、燃費を用いて運搬による収集運搬費用を推計する。
- 収集運搬費用から3.で推計された運搬による収集運搬費用を差し引き、収集による収集運搬費用を求める。収集による収集運搬費用は、その地域に位置する処理場が集めるべき廃棄物による収集負荷の合計とする。
- 収集による収集運搬費用に影響を与える要素は旧モデルから、ステーション数とステーションごとの移動距離の合計と考えられる。この2つの要素について代替変数を用いて重回帰モデルを作成する。

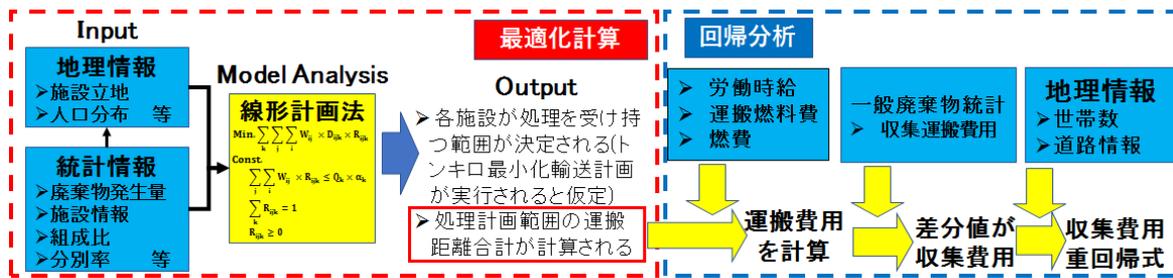


図3.3.2 修正Grid City Modelの作成フロー

(2) 処理施設の規模による熱供給可能量の推定

供給可能量の計算では

- 収集したすべての廃棄物を焼却し、熱に変換
- 供給可能な熱のポテンシャルは低位発熱量から求める
- 廃棄物種毎の低位発熱量を整備
- 熱交換効率からのロスを含めて推定(85%とする)
を想定して求める

収集運搬後の廃棄物は、各施設で焼却されるものと考え、産業への熱供給可能な蒸気量はOhnishi et. al.¹⁾による方法を用い、以下の式に従うとした。

$$\begin{aligned}
 WST_k^{IF} &= \sum_{COM} \sum_j \sum_i W_{ij}^{COM} \times R_{ijk}^{COM} \\
 LHV_k^{IF} &= \sum_{COM} \sum_j \sum_i \frac{LHV^{COM} \times W_{ij}^{COM} \times R_{ijk}^{COM}}{WST_k^{IF}} \quad \text{式(1)} \\
 Q_k^H &= LHV_k^{IF} \times WST_k^{IF} \times \frac{HR_{IF}}{100} \\
 COM &\in (\text{food, pla, paper, other})
 \end{aligned}$$

WST_k^{IF} は廃棄物処理施設 k における廃棄物処理量[t/day]、 W_{ij}^{COM} は各メッシュにおける組成 COM の廃棄物発生量[t/day]、 R_{ijk}^{COM} は組成 COM の各メッシュから施設 k への輸送する廃棄物の割合[-]、 LHV_k^{IF} は廃棄物処理施設 k の焼却炉内における低位発熱量[kJ/kg]、 LHV^{COM} は組成 COM の低位発熱量原単位[kJ/kg]、 Q_k^H は廃棄物処理施設 k が産業に供給可能な熱量[MJ/day]、 HR_{IF} は焼却炉の熱回収効率[-](=0.85)、 COM は廃棄物の組成を表し、**food**、**pla**、**paper**、**other**はそれぞれ厨芥、プラスチック、紙、その他の廃棄物を表す。

(3) 産業立地による熱需要量の地理的推定

サブテーマ1の成果を踏まえて、産業熱需要量の推計するフローチャートを図3.3.3に示す。まず、3次工業統計メッシュと工業統計細分類から対象産業種別製造品出荷額と対象産業種別事業所数を推計する。次に、産業施設におけるエネルギー消費の実態総調査2017²⁾から産業種別熱需要原単位を作成する。こうして推計した対象産業種別製造品出荷額、対象産業種別事業所数、産業種別熱需要原単位(工程別、①洗浄②乾燥③殺菌④反応・溶解⑤濃縮・蒸留⑥空調⑦他生産工程 表3.3.1参照)から産業熱需要量を推計する。

実態総調査をもとに対象とする産業種を表3.3.2に示す。ただし、産業中分類や細分類と必ずしも一致しない。一致しないものは実態総調査の記載をもとに含まれる細分類を把握し、県の製造品出荷額・事業所数の比率から推計を行う。

以上をまとめた産業熱需要量の推計方法を図3.3.4に示す。

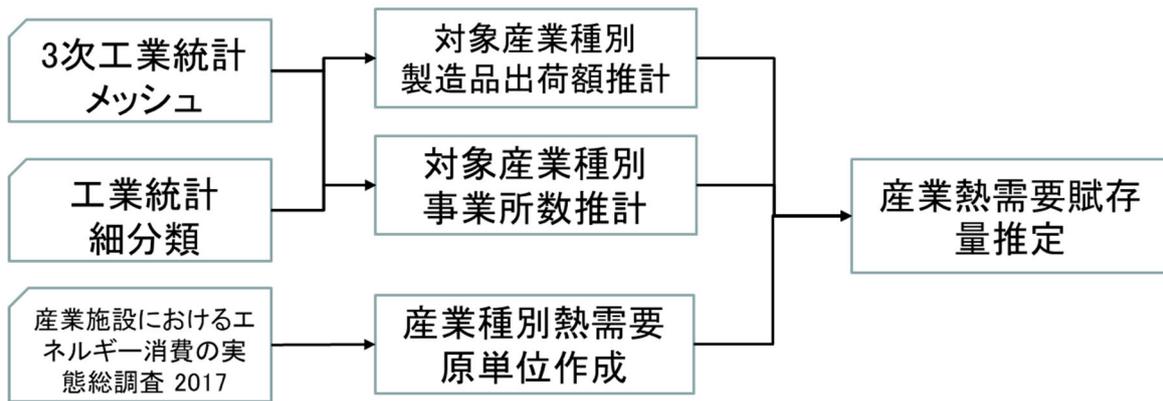


図3.3.3 産業熱需要量の推計のフローチャート

表3.3.1 製造品出荷額当たり原単位の推計例

業種名 [TJ/百万円]	①洗淨	① 乾燥	② 殺菌
①食料品 (食材加工)	5.71E-05	8.95E-04	1.26E-03
②食料品 (調理品 (中食))	3.74E-04	9.15E-06	1.83E-03
③食料品 (調味料)	2.91E-05	8.75E-04	6.81E-05
④食料品 (パン・菓子)	4.66E-07	1.28E-06	0.00E+00
⑤飲料・たばこ・飼料 (清涼飲料)	2.25E-06	0.00E+00	4.54E-03
⑥飲料・たばこ・飼料 (酒類)	2.19E-04	0.00E+00	7.22E-04
⑦繊維工業	0.00E+00	6.24E-03	0.00E+00

表3.3.2 実態総調査をもとに対象とする産業種

③ 食料品 (食材加工)	⑪ 医薬品
② 食料品 (調理品 (中食))	⑫ 石油製品・石炭製品
④ 食料品 (調味料)	⑬ プラスチック製品
⑤ 食料品 (パン・菓子)	⑭ ゴム製品
⑥ 飲料・たばこ・飼料 (清涼飲料)	⑮ 窯業・土石製品
⑦ 飲料・たばこ・飼料 (酒類)	⑯ 鉄鋼業
⑧ 繊維工業	⑰ 非鉄金属製品
⑨ パルプ・紙・紙加工品	⑱ 一般機械器具
⑩ 無機化学	⑲ 電子部品・デバイス・電子回路
⑪ 有機化学	⑳ 輸送用機械器具 (自動車)

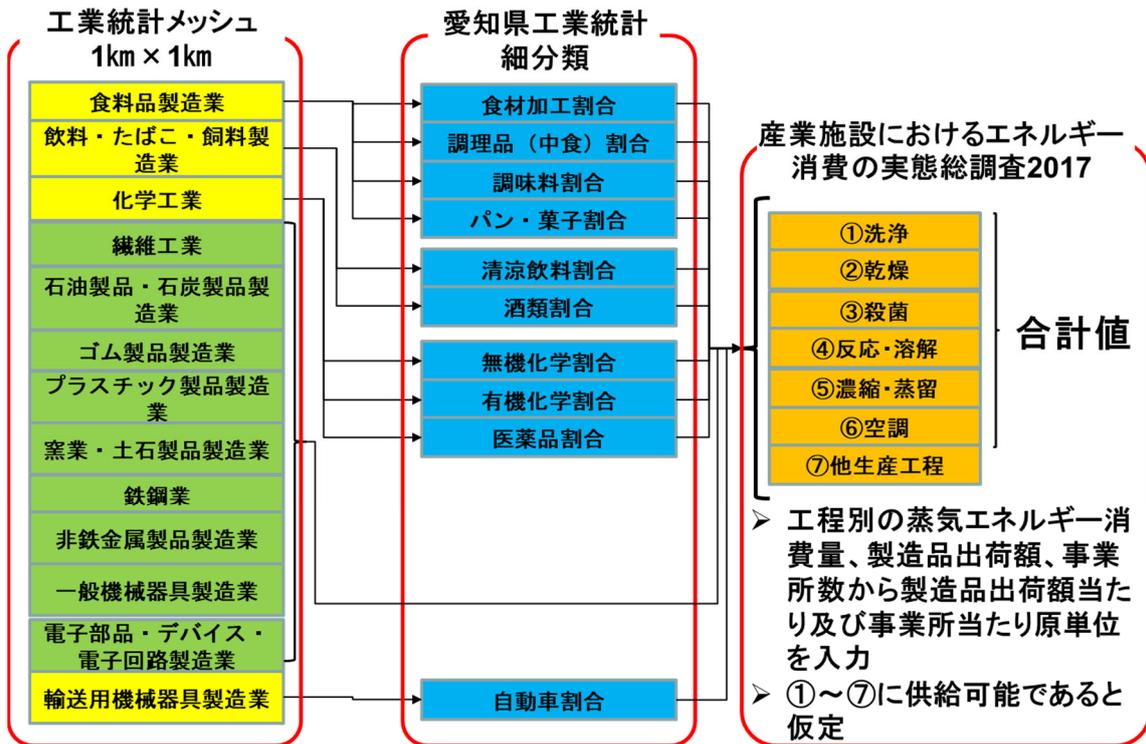


図3.3.4 産業熱需要量の推計方法

なお、複数の産業種で1kmメッシュ内に1つしか事業所がないセルが50%以上であることが判明した。工業統計メッシュではメッシュ内に事業所が1か所の場合、事業所の製造品出荷額を確認することはできない。こうした事業所が1つのセルに事業所当たり原単位を使用すると、実態に合わない熱需要を与える可能性がある。

そこで、体積保存則に従い、事務所1か所のセルにおける製造品出荷額の按分方法を検討する。従業員数で製造品出荷額を予測できるかを判断するために、図3.3.5に従業員数とセル内の製造品出荷額の関係を示す。鉄鋼業のように、従業員数に相関と考えられる産業もあるが、機械器具製造業のように、そうでもないものもある。また、中分類の中にはメッシュに複数事業所がない産業もある。よって、複数事務所が県内にない産業は従業員数で按分を行い、機械器具製造業のようにR²値が小さい場合、本研究では、製造品出荷額が企業の生産活動の結果であることから、非秘匿データの各地点の従業員数及び地理的要素を変数とするコブダグラス型の多変量生産関数を求め、求められた値によって按分する方法を検討した。地理要素としては、日本の産業分布を推計する確率モデルの構築を検討した既往研究(荻野ら)で使用している変数を参考に、港までの距離、空港までの距離道路密度、市場までの距離、高速道路までの距離、用途地域、人口密度を使用した。

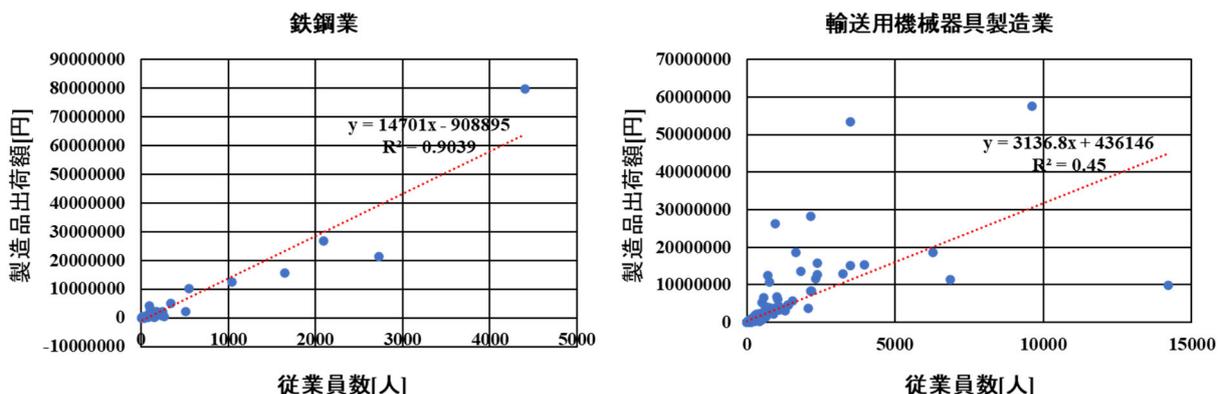


図3.3.5 従業員数とセル内の製造品出荷額の関係(セル内に複数事務所データ)

図3.3.6に工業統計メッシュにおける秘匿データの按分方法を示す。サンプル数15を超えない場合には従業員数による按分を行い、それ以上の散布数の場合には統計分析によって従業員数のみ有意なパラメータである場合には従業員数による按分、従業員数以外の要素にも有意なパラメータがある場合には求められた生産関数に基づく数値で按分を行った。

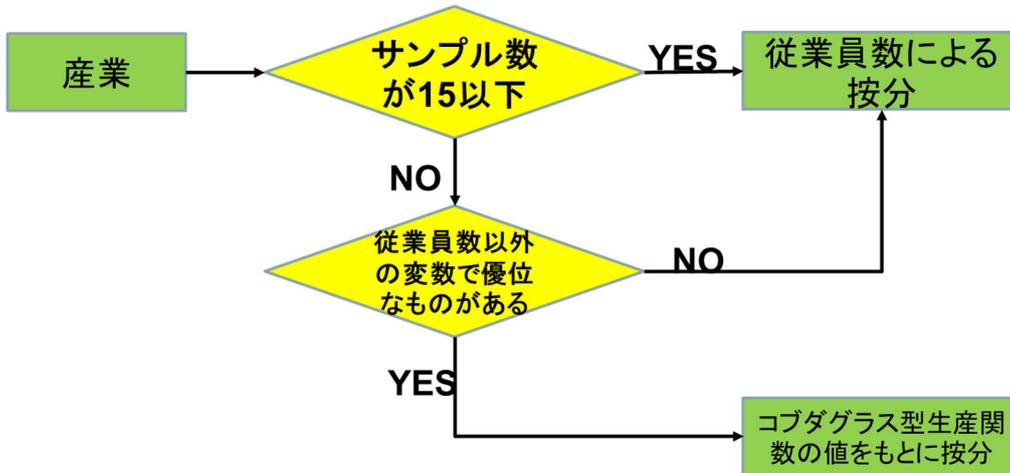


図3.3.6 工業統計メッシュにおける秘匿データの按分方法

(4) 熱導管整備による熱供給可能な範囲の設定

熱利導管整備による熱供給可能な範囲を評価するため、熱供給推計モデルを構築した。図3.3.7に熱導管整備による熱供給可能な範囲の設定に関する模式図を示す。構築した熱供給推計モデルは以下の式で示されるような非線形計画法で表され、熱損失は常に1割であると仮定した。

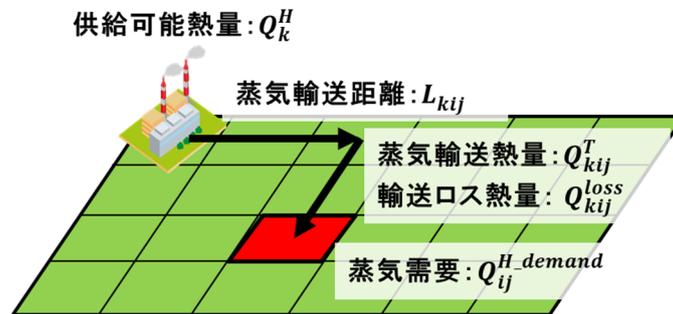


図3.3.7 熱導管整備による熱供給可能な範囲の設定に関する模式図

エネルギー実態総調査から全ての産業で上記利用の範囲は180℃程度までと想定し、200℃が末端までであれば十分と考えられる。そのため、末端温度を200℃とし、蒸気の圧力と温度の関係から末端圧力 p^{limit} が1.5Mpaとした。その結果、熱の輸送が可能な最大距離は約6.6kmとなり、グリッドが1km単位であることから6kmまで輸送可能とした。

$$\begin{aligned}
 \text{Max.} \quad & \sum_i \sum_j \sum_k (Q_{kij}^T \times 0.9) \\
 \text{Const.} \quad & Q_k^H \geq \sum_i \sum_j Q_{kij}^T \\
 & Q_{ij}^{H_demand} \geq \sum_k Q_{kij}^T \times 0.9 \\
 & L_{kij} \leq L^{limit}
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$L^{limit} = p_{IF} - \frac{\lambda (1+k) v^2}{10^6 \frac{d}{2} \rho_s L} \geq p^{limit}$$

また、以上の廃棄物発生分布の推計に用いるデータを表3.3.3に示す。

表3.3.3 廃棄物発生分布の推計に用いるデータ

項目	出典
処理方式	H27 一般廃棄物処理実態調査結果
廃棄物発生量	
施設容量	
現在の運転状況	
廃棄物の組成	H27 一般廃棄物処理実態調査結果 H22度廃棄物の広域移動対策検討調査及び廃棄物当循環利用量実態調査報告書
分別率(厨芥)	H27 一般廃棄物処理実態調査結果 廃棄物等循環利用量実態調査編 第4章 一般廃棄物の循環利用量
分別率(紙、プラスチック)	H27 容器リサイクル法に基づく市町村の分別収集及び再商品化の実績について
メッシュ間距離	H22 国勢調査 地域メッシュ統計
施設立地	
人口	
産業立地	H20 工業統計メッシュ
産業細分類	H20 工業統計細分類
産業別熱需要量	産業施設におけるエネルギー消費の実態総調査 2017 施設個別情報編
広域化計画の設定	第2次愛知県ごみ焼却処理広域化計画(平成20年度～29年度)

(5) シナリオ分析

清掃工場から産業への熱供給事業の実行可能性を求めるには、どの程度熱の需給がマッチングする可能性があるか、熱供給によって、どの程度利益が得られるかを評価する必要性がある。

また、日本では最終処分場の確保難や人口減の予測等から清掃工場数の削減および1施設の広範囲処理を行う広域化が全国で計画されている。このような社会的情勢から、広域化した場合の熱供給事業の実行可能性についても評価することが望まれる。

加えて、本研究では式(2)に基づき、最大熱供給可能距離を6kmとしたが、熱導管で蒸気を輸送可能な距離は1kmであるとみなされている。そのため、距離を変えた場合の評価についても検討を行うことが望ましいと考えられる。

上記のような理由から、本研究では、最大供給可能距離を1km、3km、6kmの3シナリオとし、施設立地を現状と広域化計画実行時の2シナリオ、合計6シナリオについて熱供給量と熱供給に伴う利益について分析を行った。

また、詳細な地域特性による影響を評価するため、各シナリオの個別施設においても同様の分析を実施した。施設からの熱供給可能量が十分であった場合、各メッシュ地点が採算性を持つかは式15で求めることができる。式(3)の条件を満たすメッシュの数および総量計をもとに、需要側からの熱供給性についても分析を行った。

$$p^{stream} \times Q_{kij} \times 0.9 - \frac{(Cost_{kij}^{variable}(Q_{kij}, L_{Rij}) + Cost_{kij}^{fix}(L_{Rij}))}{Y_{ppp}} \geq 0 \quad \text{式(3)}$$

p^{steam} は蒸気価格を表し、日本のガス会社である東京ガスの大口需要家への都市ガス供給価格57.34円/m³をもとに、1.3267円/MJとした。 $Cost_{kj}^{variable}(Q_{kj}, L_{kj})$ は施設kから地点ijへ熱供給する熱導管の変動費を表し、供給熱量 Q_{kj} と距離 L_{kj} の関数となることを表す。 $Cost_{kj}^{fix}(L_{kj})$ は施設kから地点ijへ熱供給する熱導管の固定費を表し、距離 L_{kj} に比例することを表す。 Y^{pipe} は熱導管の耐用年数を表し、ガス供給用の鑄鉄製導管を用いて22年とした。

3.2 地理情報システム (GIS) による全国での焼却熱の産業利用適地推計

焼却施設建設に対する意識調査結果に基づき、新規焼却施設を立地する候補地を抽出するために、現在の工業団地に立地する焼却施設を抽出する手法を開発する。

(1) 使用データ

- ・国土数値情報 工業用地データ

「工業用地」とは、公共、民間等の開発主体が一定の区画の土地に工業用地として、必要な基盤を整備開発し、工場などを計画的に立地させた地域をいい、本データはそのうちの敷地面積10ha以上の用地（工業団地）と企業が自社事業所のために開発または購入した工場用地で工業団地以外の単独立地による敷地面積10ha以上の用地（単独工場用地）をGISデータとして整備したものである。

工業団地：2018地点、単独工場用地：1358地点

- ・国土数値情報 廃棄物処理施設データ

一般廃棄物焼却処理施設 6617件 産業廃棄物中間処理施設 11734件

一般廃棄物中間処理施設データは処理の種類がわかるため、焼却施設を抽出することができるが、産業廃棄物中間処理施設に関しては、処理の種類がわからないため焼却施設を抽出することができない。各データの内訳を表3に示す。

表3 廃棄物処理施設データの内訳

一般廃棄物中間処理施設データ
都道府県名、地方公共団体コード、施設コード、地方公共団体名、施設設置者（法人にあつては法人名）、施設名称、年間処理量、資源化量（資源物回収、燃料ガス回収、生産量・搬出量の別）、焼却対象廃棄物、施設の種別、処理方式、炉型式、処理能力、炉数、使用開始年度、余熱利用の状況、余熱利用量（仕様値・公称値）、余熱利用量（実績値）、発電能力、灰処理設備の有無、運転管理体制 など
産業廃棄物中間処理施設データ
経緯度、事業者名、所在地、産廃施設種別、特別管理、取扱品目
平成24年度国土数値情報【廃棄物処理施設】作成業務報告書、平成25年3月、国土交通省 国土政策局

各都道府県産業廃棄物協会名簿（公表）には、必ずしも全て業者が名簿に記載されているわけではない。

施設別のリストがある協会：

宮城、香川、山梨、東京、群馬、埼玉、茨城、静岡、岐阜、新潟、石川、福井等

廃棄物種類別のリストがある（企業のHPを調べる必要あり）：北海道、千葉、熊本等

施設別、種類別のいずれのリストもない協会（企業のHPを調べる必要あり）：兵庫、愛知等

また、産廃情報ネット（公益財団法人 産業廃棄物処理事業振興財団）

<http://www.sanpainet.or.jp/>

では、処理施設の種類はわからない

(2) 使用ソフトウェア

- ・QGIS v2.18

使用例を図3.3.8に示す。

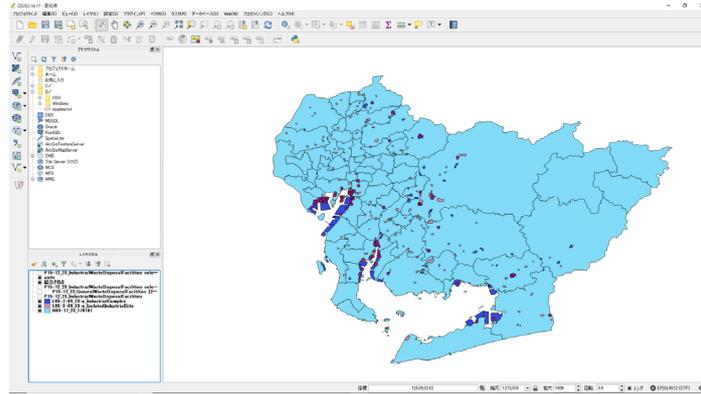


図3.3.8 QGIS画面（愛知県の工業団地及び焼却施設の表示）

・ Google earth

(4) 処理フロー

一般廃棄物、産業廃棄物の各立地候補地抽出のための処理フローを以下に示す。

・ 一般廃棄物

- a. QGISに工業団地・工業用地データ、一般廃棄物焼却処理データ、産業廃棄物中間処理施設データ（共に国土数値情報データ）を読み込ませる
- b. QGISによって空間検索を行い、一致したデータを抽出
- c. 新規焼却施設設置の候補地抽出

・ 産業廃棄物

- a. QGISに工業団地・工業用地データ、一般廃棄物焼却処理データ、産業廃棄物中間処理施設データ（共に国土数値情報データ）を読み込ませる
- b. QGISによって空間検索を行い、一致したデータを抽出
- c. 産業廃棄物中間処理施設中の焼却施設を、名簿等を用いて照合する
- d. Google earthによる工業団地や隣接工場の確認
- e. 新規焼却施設設置の候補地抽出

3.3 焼却施設建設に対する意識調査と住民合意の手続き

本研究課題が目的としている高度熱利用施設を備えた廃棄物焼却施設（以下、焼却施設）の導入のためには、焼却施設が立地する最適地の選定が必要である。そのためには、これまでの焼却施設同様に地域の理解が必須である。愛知県等の自治体の広域化計画の進捗状況の調査からも、立地が広域化推進の大きな阻害要因の1つとなっていることが分かる。そこで、焼却施設設置の可能性を住民の意識から明らかにし、その条件を抽出する。また、高度熱利用施設を備えた廃棄物焼却施設を立地するための地域住民の合意に至る手続きについて整理をする。

<焼却施設建設に対する意識調査>

- a. 目的 焼却施設との心理的距離によって、施設建設の意識が変わるかを調査する
- b. 手法 ネットアンケート（マクロミル社）
- c. 日時 2018年2月16-18日
- d. サンプル数620件 内訳を表3.3.4に示す。

表3.3.4 アンケート調査対象の割合

	寒冷地(北海道、東北、北陸)	非寒冷地
都市部	25%	25%
その他	25%	25%

4. 結果及び考察

4.1 熱需給のマッチングによる焼却熱産業利用の適地の推計とシナリオ分析の結果

(1) 熱需給のマッチングによる適地の推計結果

図4.3.1は現状の施設配置及び広域化を行った場合の各施設における熱供給可能量を示したものである。現状配置では現状の処理量に対応するため、施設k2の熱供給可能量が非常に大きい。この処理範囲は名古屋市を含み複数の施設を有することから、広域化を行った場合にはk2の熱供給量は少なくなり、処理範囲内のほかの施設の熱供給量が増加する結果となった。このように、広域化を行うことで、各施設の熱供給可能量は増減し、広域化した場合に施設数が少なくなることから、熱供給可能量の平均値は大きくなる傾向が見られた。

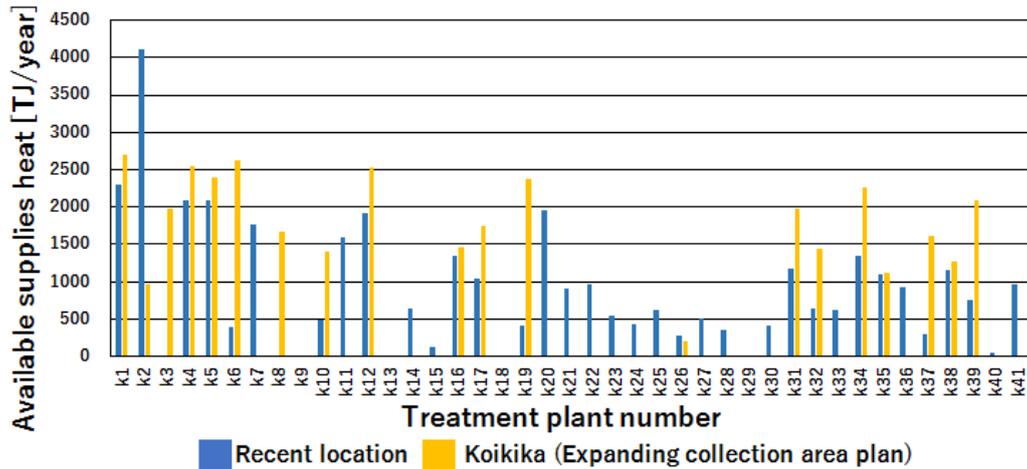


図4.3.1 各施設の熱供給可能量

図4.3.2に愛知県における産業熱需要量を1kmメッシュで求めたもの示す。この結果から、愛知県では北東部の産業熱需要が小さく、名古屋を中心とする尾張地域や西三河中央から臨海部、豊橋周辺の産業熱需要が大きい。これらの産業熱需要の大きい地域は人口が多い地域と重なった。

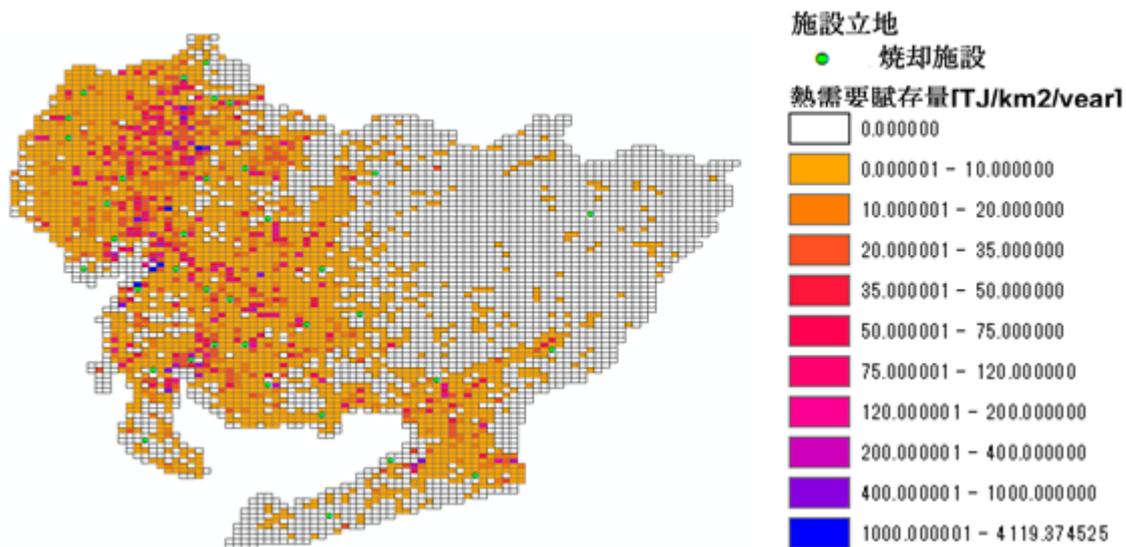


図4.3.2 愛知県における熱需要分布模式図

図4.3.3に熱需要量と輸送可能範囲の比較を示した。輸送可能範囲は既存の清掃工場からの熱供給が可能な範囲である。産業熱需要量の多くは輸送可能な範囲に含まれ、廃棄物処理からの熱を産業に利用するポテンシャルは大きい。特に量の多い名古屋周辺は複数の施設があり、供給・需要ともに産業熱利

用のポテンシャルが大きい。一方で、施設がなく熱需要があっても供給の可能性のない地域も多い。特に赤丸の名古屋北部は量が多いが、清掃工場が近隣にないため、輸送可能なところに需要がないことが分かった。

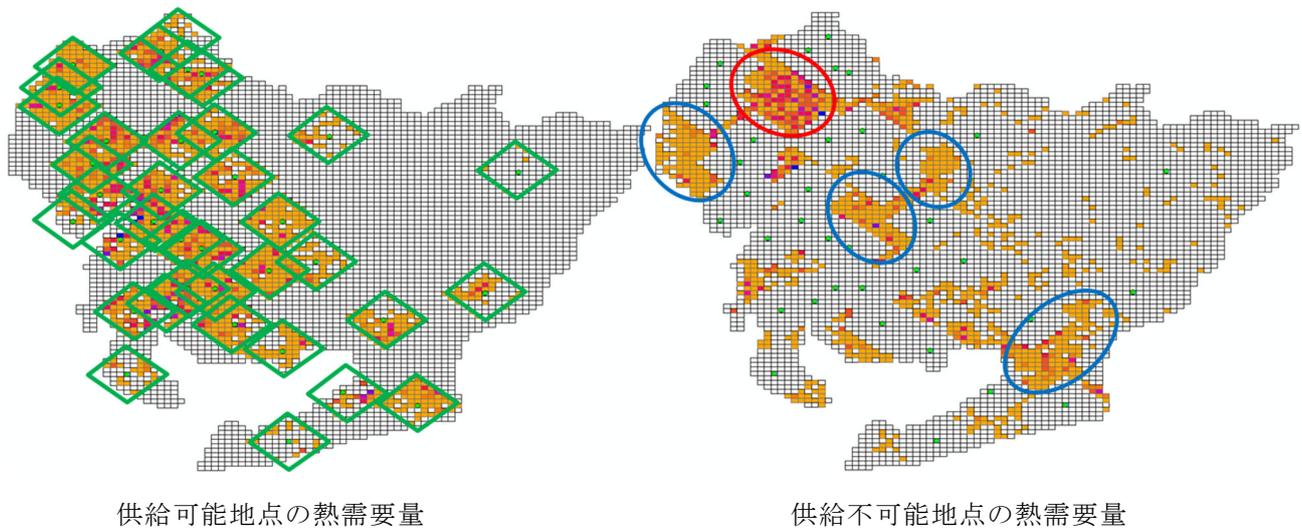


図4.3.3 愛知県における熱供給可能地点の熱賦存（左）と熱供給不可能地点における熱賦（右）
凡例は図4.3.2と同じ

(2) 広域化計画シナリオによる分析

シナリオ分析における、広域化計画シナリオとして「第2次愛知県ごみ焼却処理広域化計画(平成20年度～29年度)」(以後、愛知県広域化計画)にある各ブロックにおける施設数になると仮定した。ブロックで残すことが決まっている施設がない場合には、最も年数が経っている施設の位置に統合すると仮定した。また、施設規模は処理すべき廃棄物量をすべて処理できるように、現状の施設規模の合成値とした。表4.3.1は広域化区分と含まれる市町村、現状の施設数及び広域化計画の結果残す施設数を表したものである。

表4.3.1 広域化計画による施設設定

広域区分名称	含まれる市町村	現施設数	広域施設数
名古屋ブロック	名古屋市、あま市、清須市、北名古屋市、豊山町	5	5
尾張北ブロック	犬山市、小牧市、岩倉市、江南市、大口町、扶桑町	3	1
春日井ブロック	春日井市	2	2
海部津島ブロック	津島市、愛西市、弥富市、大治町、蟹江町、飛鳥村	1	1
尾張西部ブロック	一宮市、稲沢市	2	1
尾張東部・尾三ブロック	瀬戸市、尾張旭市、長久手市、日進市、みよし市、東郷町	1	1
知多北部ブロック	東海市、大府市、豊明市、東浦町、阿久比町、知多市	3	1
知多南部ブロック	半田市、常滑市、武豊町、美浜町、南知多町	3	1
豊田加茂ブロック	豊田市	1	1
岡崎西尾ブロック	岡崎市、幸田町、西尾市	5	2
衣浦東部ブロック	碧南市、高浜市、刈谷市、知立市、安城市	3	2
東三河ブロック	豊川市、蒲郡市、新城市、設楽町、東栄町、豊根村	5	2
豊橋田原ブロック	豊橋市、田原市	4	1

図4.3.4に現状の施設立地および広域化計画実行時の各清掃工場から熱供給を最大限にした場合の供給範囲を表したものの比較を示す。産業熱需要量に対し、廃棄物処理施設で供給可能な熱量は小さいため、現状施設立地・広域化計画双方とも熱供給がなされる範囲は限られたものになった。また、産業熱需要量よりも供給される熱量が制限となるため、供給範囲の広さは処理施設の廃棄物処理量に依存するものとなった。

図4.3.5に各距離設定による清掃工場から空間熱供給量を示す。供給可能距離を1km, 3km, 6kmとし、それぞれの熱供給を比較した。どの距離でも施設数の多い現状のほうが熱利用率は大きくなるのがわかる。また、熱需要の大きいメッシュが施設の外縁にあることが多く、メッシュ単体への供給量も6kmのほうが大きい。

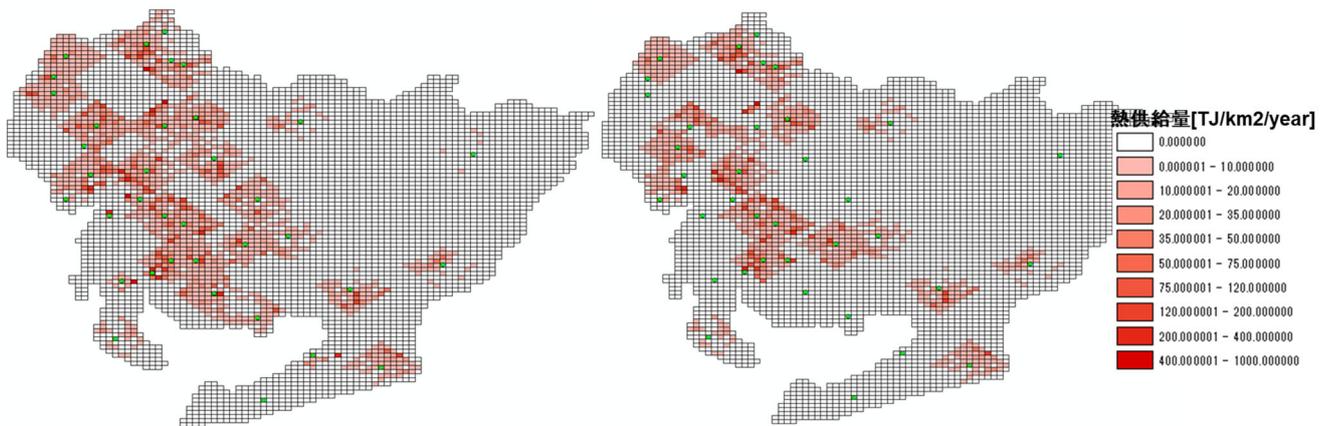


図4.3.4 現状の施設立地（左）および広域化計画実行時（右）の各清掃工場からの最大限供給範囲

		供給可能距離の設定		
		最大1km	最大3km	最大6km
現状配置				

図4.3.5 各距離設定による清掃工場から空間熱供給量

図4.3.6は最大供給可能距離を変えた各シナリオにおける余剰熱量と余剰率を表したものである。愛知県では最大で36360TJ/yearの蒸気を清掃工場から供給することが可能であった。どの最大供給可能距離

離であっても熱には余剰があり、最も熱利用量が多い6km現状配置の場合では清掃工場で生産できる熱の60%程度を使用することができる。また、距離を短くした場合には余剰量はさらに増え、1kmでは利用料は1割に満たない結果となった。このような結果から、熱導管の効率化や新たな熱輸送法によって熱供給可能距離の延長を伸ばすことができる場合には、供給面からも熱利用を高められることが確認された。

図4.3.7は最大供給可能距離を変えた各シナリオにおける熱供給による純利益を示したものである。この結果から、1km圏内で熱供給を最大にした場合には純利益がプラスとなるが、3km、6kmではマイナスとなった。これは熱供給に伴う熱導管費用が距離によって増加し、熱需要が少なく不採算な地点が多く含まれるようになるためと考えられる。このような結果から、清掃工場の経済的利益を考えた場合、どのような供給地点でも利益が得られるわけではなく、供給地点の選別が必要であることが示された。

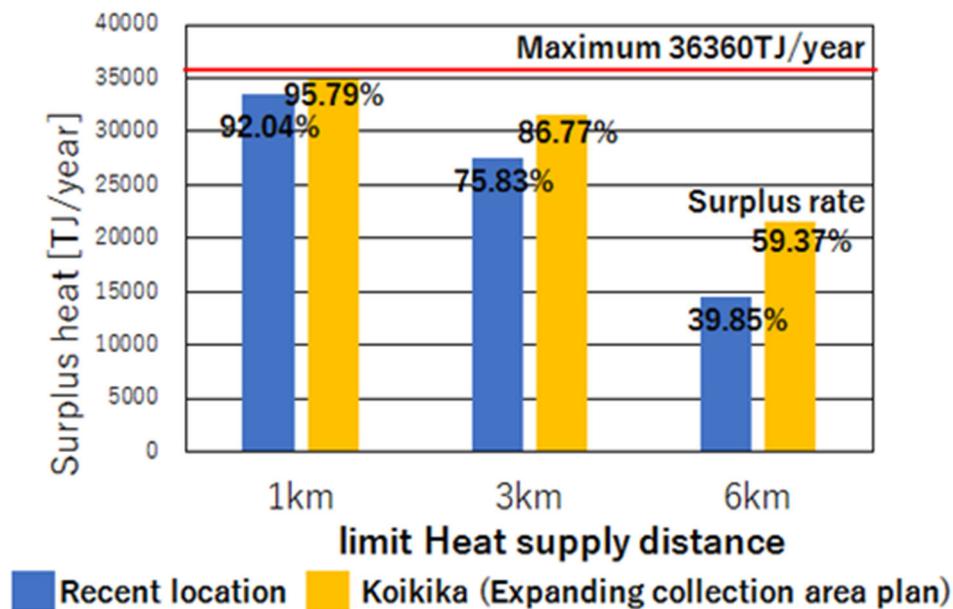


図4.3.6 各距離設定における余剰熱量

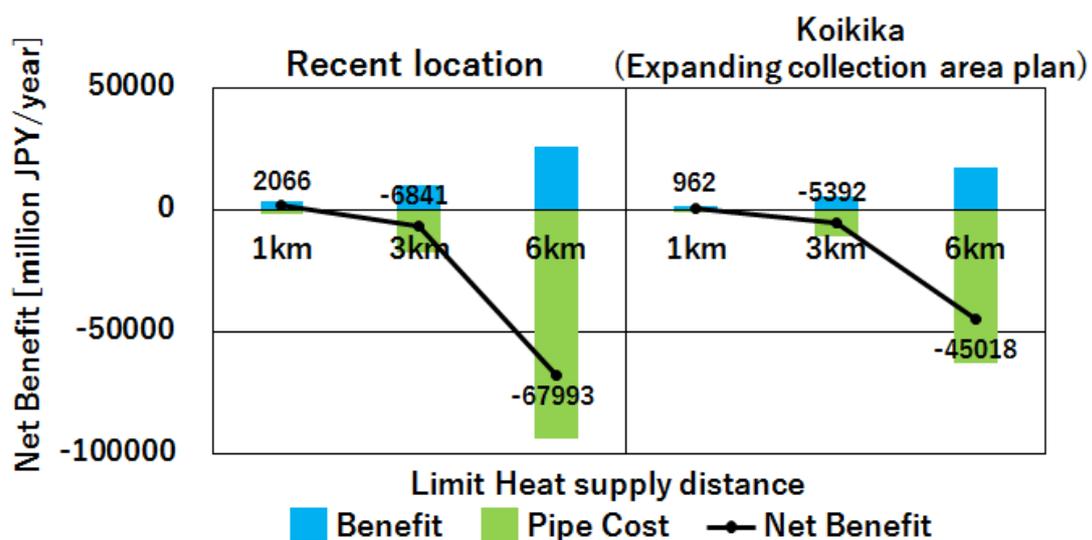


図4.3.7 各距離設定における余剰熱量

(3) 施設ごとのシナリオに伴う収益及び余剰熱量

図4.3.8は現状配置における各施設の各距離設定での熱供給による純利益を表し、図15は広域化における各施設の各距離設定での熱供給による純利益を表す。図4.3.8から、多くの施設で供給距離が延びると不採算な地点が増えることによって純利益はマイナスになっていくが、k14のように距離延びるごとに純利益が増加する施設や、k27やk33のように1km圏内では不採算であるが、範囲を広げることで採算がとれる施設も見られた。このような結果から、熱供給による採算性は近隣産業の集約性に影響を受けているものと考えられる。

図4.3.8を図4.3.9と比較した場合、k14やk28のように再生の高い施設が再編によってなくなったため、純利益の大きい施設は現状配置に比べて少ない。一方で不採算な施設がなくなったため、最大限熱供給を行う場合には図7のように広域化のほうが、マイナスが小さくなる。しかし、採算性の合う事業を精査した場合、現在の広域化のほうが、純利益が低くなる可能性があるとして示唆された。

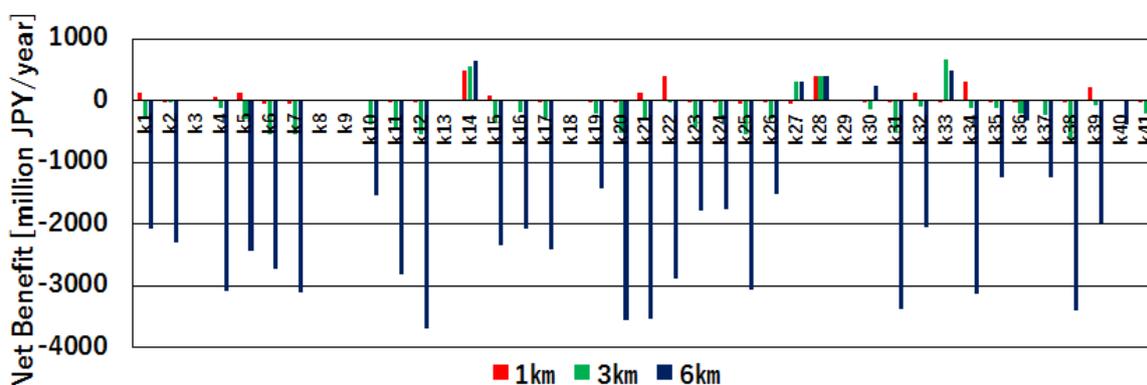


図4.3.8 現状配置における各施設の各距離設定での純利益

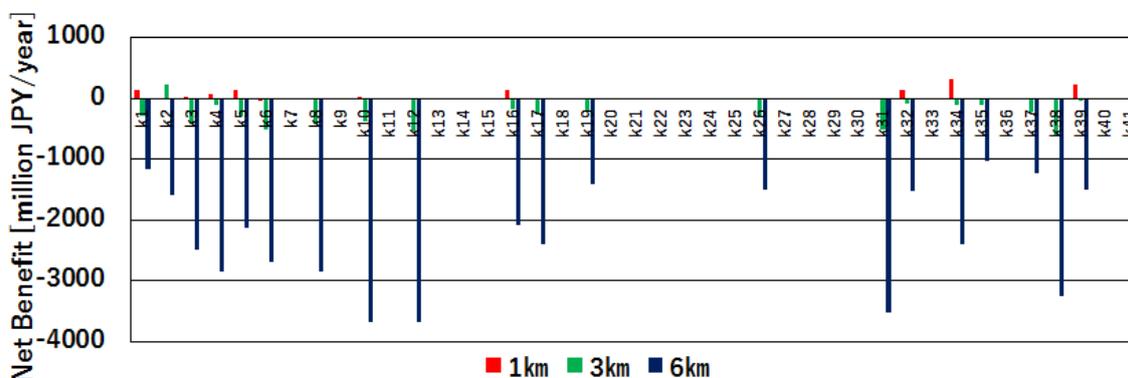


図4.3.9 広域化における各施設の各距離設定での純利益

各施設における事業効果を評価するため、式(3)を満たすメッシュの総数(採算性メッシュ数)と採算性メッシュの純利益合計を求めた。ただし、以下の分析は本研究のシナリオにおけるメッシュ数及びその純利益の合計である。そのため、供給可能距離が延長されることで近接施設間での需要の取り合いになる場合があり、必ずしも延長が伸びた方が採算性メッシュ数やその純利益合計が増加する結果とはならない。

図4.3.10は熱供給範囲がより広い現状の計画に着目し、6km圏内で最も採算性メッシュの純利益が大きいk1、6km圏内で採算性メッシュ数をもっと大きいk5、全ての供給可能距離圏で純利益がプラスとなったk14、1km圏内のみ純利益がマイナスになったk33、すべての距離圏でマイナスとなったk38について採算性メッシュ数とその純利益合計を表したものである。この結果から、高い純利益合計を持つk1やk5であってもすべてに熱供給を行うような事業を想定した場合には事業性がマイナスになることが確認で

きた。特に、k1は全施設の中で6km圏内の採算性メッシュにおける純利益は最も大きくなるが、採算性メッシュ数は7で熱供給を行ったメッシュ73に対して10%に満たないことから全体としては不採算となった。一方、k14では採算性メッシュ数は5と少ないが、熱供給可能なメッシュ自体が7と少ないことから、70%近いメッシュが採算性メッシュとなったことから全体としても採算性が得られたものと考えられる。

一方、k33は6km圏内で18%程度の採算性メッシュ割合だが、1つのメッシュで600 million/year程度の純利益がある大口需要があるため、このメッシュを含む圏内であれば採算性を得ることができた。k38では3km圏内までの採算の合うメッシュの純利益合計が非常に小さく、建設コストに見合わない。また、6km圏では採算性メッシュの割合が10%に満たず、採算性の合わないメッシュへの建設費によって全体として不採算となった。以上から、大口の需要が存在するか採算性のあるメッシュの割合が大きい場合には全体に熱供給しても採算性が合うことが確認できたが、詳細な条件についてはさらなる分析が必要であると考えられる。図4.3.10の上部図は採算性の合うメッシュにのみ熱供給を行った場合の純利益とみなすことができる。この場合、6km圏内までの供給によって、多くの施設で数億¥/year程度の利潤を得られ、清掃工場からの熱供給事業はその需要先を選別する必要があるが、経済的にもポテンシャルがあるものと考えられる。

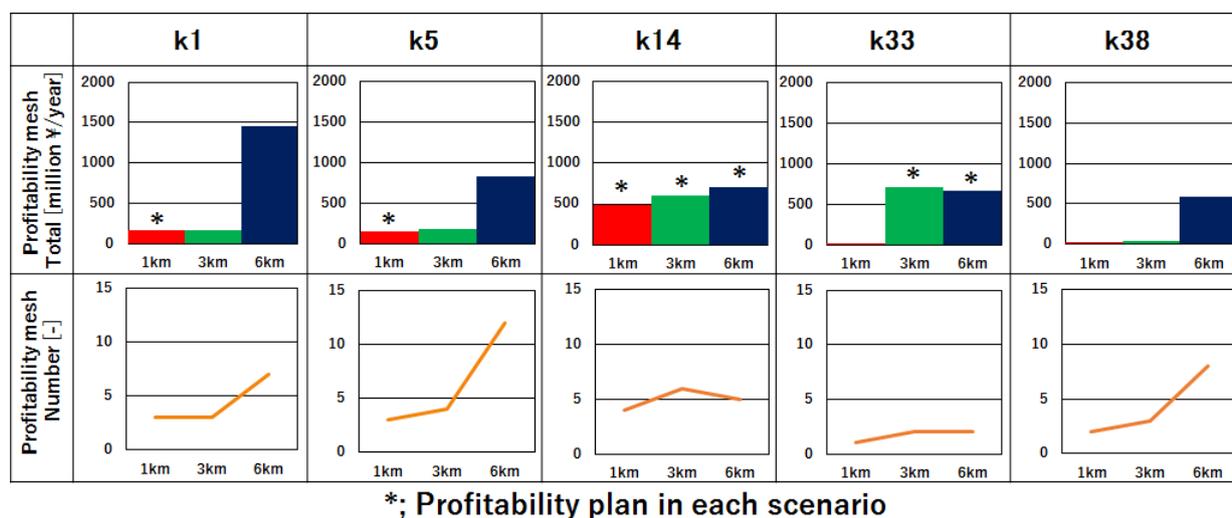


図4.3.10 施設の採算性メッシュ数及びその純利益合計

廃棄物処理施設からの効率的なエネルギー回収を検討するため、廃棄物処理によるエネルギーを熱導管によって、蒸気を産業に輸送した場合のポテンシャルの評価システムを構築、現状施設立地と広域化計画を実行した場合の2つのシナリオについて評価を行った。その結果、工業統計メッシュとエネルギー実態総調査から愛知県における産業熱需要量を1kmメッシュで推計し、人口が多い地域と重なるところを確認することができた。また、現状の施設配置では、熱需要ポテンシャルは大きい施設が存在しないことから、熱供給を行えない地域が存在することも確認できた。加えて、現状施設立地および広域化計画実行時における最大熱供給範囲を評価した。その結果、産業熱需要量に対し、廃棄物処理施設で供給可能な熱量は大きいため、供給範囲の広さは施設立地に依存するものとなった。供給熱量の総量は施設数と供給可能距離に依存し、最大となる現状立地で6kmを供給可能圏域とした場合には製造熱量の約60%を供給するものとなった。

経済性の分析の結果として、1km圏内であればすべてに熱供給を行った場合にも採算性があるものの、供給可能距離を延ばした場合に採算性の合わない地点が増えることで全量熱供給を行うと採算性が合わないことが確認できた。ただし、採算性の合わない距離であっても採算性の合う箇所だけに供給した場合には1施設で数億程度の利潤が得られるため、取捨選択は必要となるが経済的にも利点が得られ

る可能性が確認できた。

以上の結果から、愛知県を対象とした場合、廃棄物処理による熱エネルギーを産業部門へ供給する物理的なポテンシャルは、大きな熱需要賦存を持ち、それに供給できる十分な量の熱量があることから、大きいと考えられる。また、経済的なポテンシャルは、すべての地点に熱供給を行うと採算性を得るのは難しいが、一定以上の需要がある地点に供給するように選別を行うことで利潤を得られる可能性は大きいと考えられた。また、廃棄物処理施設の配置から熱需要量は大きい熱供給ができない地域が存在し、供給可能な熱量には余剰が存在する。このことから、施設立地の変更や熱輸送の効率化、民生を含む新規需要を含めることでさらなるエネルギー回収の可能性も示唆された。

4.2 地理情報システム (GIS) による全国での焼却熱の産業利用適地推計結果

一般廃棄物焼却処理施設1257件中、工業団地・工業用地内に立地するのは175件、文化施設・スポーツ施設の1km圏内に立地するのは712件であった。なお、環境省データより、一般廃棄物焼却施設のうち、温水を作り場外利用している施設は210件、蒸気を作り場外で利用している施設は76件、温水・蒸気の両方を作り場外で利用している施設は27件の合計313件であった。

また、産業廃棄物焼却施設2983件中（環境省データより）67件であった。このうち候補が多い県は、千葉 6件、岡山7件、広島10件、福岡12件であり、ともに大きな工業団地を有している県であった。

4.3 焼却施設建設に対する意識調査と住民合意の手続き

図4.3.11は自宅と焼却施設との距離に関する設問の結果である。正確な距離は住所がないとわからないので、本アンケートでは回答者自身が自宅と焼却施設との距離をどのようにとらえるかの「心理的距離」を調査することとした。その結果、約10%の回答者が、焼却施設が見えると回答した。このことから、当事者は極めて少数であり、当事者の不公平感を感じているのではないかと推測することができる。

図4.3.12は蒸気や温水を作るごみ焼却施設（一般廃棄物用）が新たに建設され、その蒸気や温水を受け取る工場が隣接地に建設されることに関する設問の結果である。約7%の回答者が「無条件で受け入れる」と回答しているが、それ以外は「受け入れない」と解釈すると、熱回収施設付きの焼却施設であっても、新たに焼却施設を建設することは容易ではない可能性もあるが、低価格でエネルギー供給が受けられるなど、自身や地域にメリットがあれば受け入れてもよいとする条件付も含めれば、受け入れても良いと考える割合が半数近くに達しており、適切な政策次第で新規に立地できる可能性も示唆された。

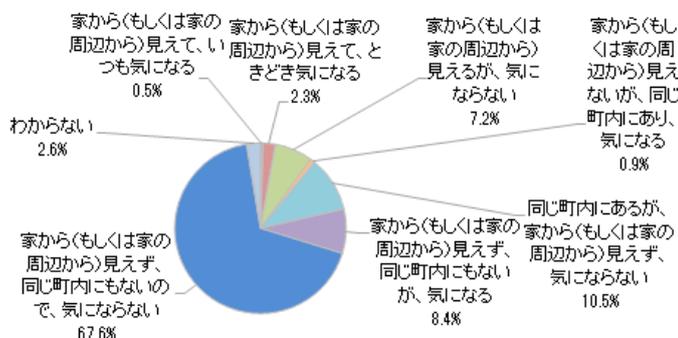


図4.3.11 焼却施設との心理的距離
(n=430焼却炉の位置がわかると答えた人のみ回答 (n=回答数))

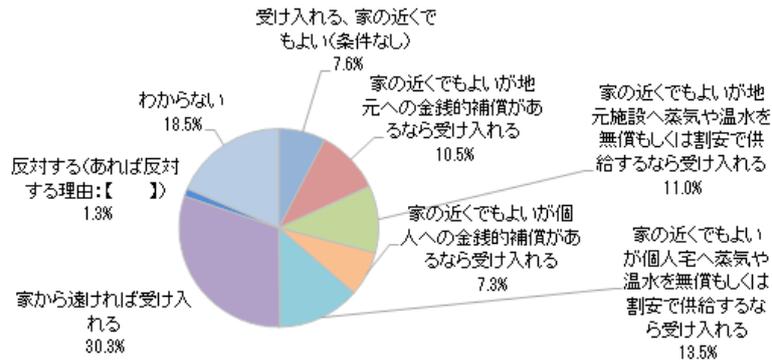


図4.3.12 熱回収施設付きの焼却施設建設（一般廃棄物）に対する住民の意識調査(n=620) (n=回答数)

図4.3.13は熱回収施設付きの焼却施設建設（一般廃棄物）に対する住民の意識と現在の焼却施設の心理的距離とのクロス集計をした結果である。「近いが、気にならない」ならびに「その他」の回答をした住民が、焼却施設建設を条件なしで受け入れてもよいと答えた回答が約10%であったのに対し、「近くて気になる」と答えた住民で焼却施設建設を条件なしで受け入れてもよいと答えた回答が約20%であった。これは、すでに焼却施設を受け入れている住民は新たな焼却施設受け入れへの心理的ハードルが低いことを表している。ただし、熱回収施設付きの産業廃棄物焼却施設建設に関しては、一般廃棄物と逆の傾向を示し、既存産業廃棄物焼却炉に対する評価が厳しいことがわかる。

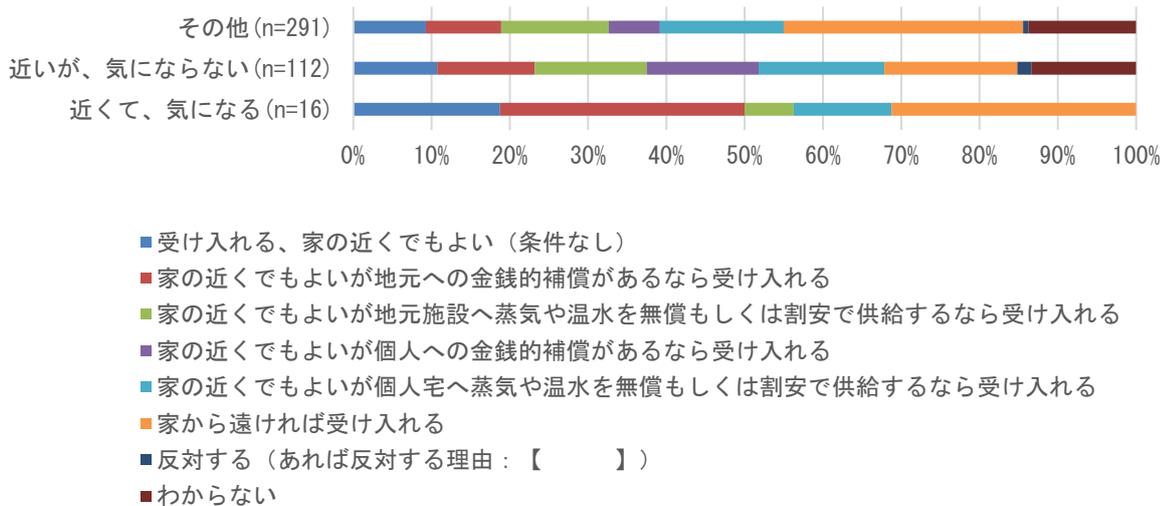


図4.3.13 熱回収施設付きの焼却施設建設に対する住民の意識と現在の焼却施設の心理的距離とのクロス集計(n=回答数)

次に、一般的な一般廃棄物焼却施設立地の手続きは以下ようになる。(3.1~3.3の手続きは並行して実施される場合が多い)

1. 処理施設整備計画
2. 立地選定
- 3.1 住民説明(住民合意)
- 3.2 業者選定委員会(業者決定)
- 3.3 処理施設周辺整備計画・まちづくり計画
4. 着工

「2. 立地選定」では以下の手順で実施する自治体が多い

2.1選定条件の策定→2.2候補地選定→2.3条件点数化→2.4最終候補地決定

「2.2候補地選定」の時に、委員会を開催し、立地の公募(千葉県四街道市)やGISによるネガティブ・ポジティブスクリーニング(奈良市、北海道恵庭市)あるいは両者のハイブリッド(山形広域)を用いて候補地を決定する。

一連の施設立地手続きにおいて住民の参加は必須であるが、どの段階において住民が参加するかは様々である。また、「住民」にも①立地の近隣に住んでいる「近隣住民」と②必ずしも立地の近隣に住んでいないが市町でNPO活動等を行っている「代表住民」の2種類が存在する。

例えば東京都武蔵野市や町田市では「1. 処理施設整備計画」の段階から「近隣住民」が委員として参加しているが、多くの自治体では「2. 立地選定」の段階で「代表住民」が委員として、「3.1 住民説明」の段階で「近隣住民」が参加する場合が多い。しかしながら、「3.1 住民説明」の段階で初めて手続きに参加した「近隣住民」の反対にあい、立地そのものが白紙に戻る場合もある(H組合)。また、近年は一般廃棄物処理の広域化が進められているが、これまで良好な関係であった自治体と「近隣住民」の関係が、他市の廃棄物が搬入されることによることによって損なわれ、新しい広域化施設の住民説明が中断することもある(T市)。

うまくいっていない自治体は施設立地の手続きの中の「3.1 住民説明」の段階で初めて「近隣住民」に参加させている。一方で、新規場所において施設立地がうまくいった武蔵野市では「1. 処理施設整備計画」の段階で「近隣住民」を委員会委員として参加させている。また、武蔵野市では立地手続きにおいて、新施設建設へ向けた「施設まちづくり検討委員会」(2008-2009 16回)、施設基本計画策定委員会(2009-2010 13回)、施設周辺整備協議会(2009- 2019 40回)、合同意見交換会(2009-10 3回、視察1回)と10年以上の歳月とのべ70回以上の委員会をにかけている。

住民合意は、高度熱利用施設を備えた廃棄物焼却施設の導入において欠かせない手続きである。同施設は単なる廃棄物の処理施設ではなく、処理施設を中心とした「まちづくり」であると言える。ゆえに、「1. 処理施設整備計画」の段階から「近隣住民」の正式な委員としての参加を促し、「近隣住民」が焼却施設を中心としたどのような「まちづくり」をしたいか長期間にわたって対話を重ねて立地を決定するのがよいと考えられる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- 焼却施設から製造工場への蒸気供給等について、熱需給のマッチングによる適地の推計が可能なモデルを作成し、需給のマッチングを評価する理論を構築した。モデルにより、愛知県を対象に広域化の有無等のシナリオ別に費用対効果のシミュレーションを実施し、対策の社会実装に資する科学的知見を提供することができた。
- モデルでは、実際焼却施設から産業への蒸気供給事業を行う際の適切なターゲットの推定に必要な手法の構成要素として、産業の分類ルールを策定した。産業比率によるクラスター分析及び決定木分析によるクラスター分類のルール化、熱供給事業実施時の純利益からのDEAスコアの計算、DEAスコアによる各産業種の事業効率性分類ルールの推定など、蒸気供給事業を評価する上で有用な手法を確立することができた。
- 地理情報システムによる全国での焼却熱の産業利用の適地推計を行うとともに、焼却施設建設に対する住民の意識を明らかにするなど、廃棄物の高度な地域熱利用に資する知見を、廃棄物政策とエネルギー政策、都市計画の関連を踏まえて提示することができた。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

- 愛知県環境局と、焼却施設から製造工場への蒸気供給に関する有効性や、その際に課題となる工業団地への焼却施設の立地を促進することの重要性について意見交換を行った。県や市町村の対策として検討されることが期待される。
- 焼却施設と製造工場の立地の近接性が重要であるが、工業団地内での焼却施設の建設が認められていないケースも多い、この障壁を取り払うため、工業団地造成事業における環境アセスメントにおいて、工業団地内において温室効果ガス及び廃棄物の発生量を削減することを奨励する通知を出すことなど、有効な対策を示した。

6. 国際共同研究等の状況

アジア工科大学院と協力して、タイ政府が廃棄物処理に関わるマスタープランを策定するに当たり、廃棄物焼却熱の産業利用の有効性に関する知見を提供するため、タイ国家戦略委員会メンバー等との意見交換を実施した。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 牧誠也, 大西悟, 藤井実, 後藤尚弘, 五味馨: 廃棄物資源循環学会論文誌, 30, 153-165 (2019)
地域特性を考慮した収集運搬による費用・CO2 排出量推計のための修正グリッドシティモデルの開発-愛知県を対象としたケーススタディー

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 後藤尚弘: 環境科学会 2017 年会、福岡 (2017) 地域資源循環のモデル化に関する理論的・実践的研究
- 2) N. Goto: International Symposium of the 11th SSMS and the 5th RCND 2017, Bangkok (2017)
IMPACT OF AREA SCALE ON MUNICIPAL SOLID WASTE TREATMENT
- 3) 後藤 尚弘、日本環境共生学会学術大会(2018) エネルギー回収機能付き廃棄物焼却施設の立地に対する住民意識に関する研究
- 4) N. Goto, S. Ohnishi, M. Fujii, The 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management 2019) Study of location of Solid Waste Incineration Plant with New Energy Recover Facilities in Japan.
- 5) 牧誠也、大西悟、藤井実、後藤尚弘、第 38 回エネルギー・資源学会研究発表会 (2019) 産業熱需要賦存量の空間分布推計法の開発及び清掃工場からの熱供給可能性の検討: 愛知県におけるケーススタディ
- 6) M. Fujii, T. Okadera, N. Goto, S. Ohnishi, S. Maki, L. Sun, The 14th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (2019) Possibility to Building Smart Energy Sharing Network in an Industrial Park Through the Information Sharing.
- 7) N. Goto, S. Ohnishi, and M. Fujii, the 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management (2019) Study on Location of Solid Waste Incineration Plant with New Energy Recover Facility in Japan.
- 8) S. Maki, S. Ohnishi, M. Fujii, N. Goto, L. Sun, 1st Asia Pacific Conference on Sustainable

Development of Energy, Water and Environment system, (2020) Evaluation of Spatio-Industrial Steam demand by Spatial Production Shipment Value Estimation and Availability analysis of Steam supply from Waste Treatment Plant.

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Satoshi Ohnishi, Minoru Fujii, Makoto Ohata, Inaba Rokuta, Tsuyoshi Fujita; Efficient energy recovery through a combination of waste-to-energy systems for a low-carbon city, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol.128, pp.394-405, 2018
- 2) 富士経済; 産業施設におけるエネルギー消費の実態総調査 2017 施設個別情報編, (2017)
- 3) 萩野保克, 遠藤弘太郎, 立地選択モデルを用いた東京都市圏における物流施設の立地ポテンシャル分析、土木計画学研究・論文集、Vol.24 No.1、pp.103-110、2007

III. 英文Abstract

Study on Technologies and Social Systems for Efficient Utilization of Heat Recovered from Waste

Principal Investigator: Minoru FUJII

Institution: National Institute for Environmental Studies
 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506, JAPAN
 Tel: +81-29-850-2447 / Fax: +81-29-850-2960
 E-mail: m-fujii@nies.go.jp

Cooperated by: Tokyo University of Science, Toyo University

[Abstract]

Key Words: Waste incineration, Industry, Exergy, Cost and effect, Business model, Support for implementation, Policy simulation

Technologies and social systems for the efficient use of heat recovered from waste have been investigated in this study.

In sub-theme 1, we proposed efficient heat utilization systems according to the scale of the incinerator, from small to large scale, and whether there is industrial heat demand in the vicinity of the incinerator within around 5 km. The overall efficiency of steam supply from an incinerator to neighboring factories is the most important part of the study. Large CO₂ emission reduction effect was expected due to the effective decrease of fossil fuel consumption in industries. Then, the increase in the net profit associated with the construction cost of the additional facility for heat utilization, operational cost and the sale profit of steam to industries was calculated. Based on those results, it was found that the investment payback period was short, namely less than several years. Thus, the excellent cost effectiveness of the proposed advanced heat utilization system was confirmed.

In sub-theme 2, the framework of the cost / benefit / risk allocation analysis related to the project (which is the key to promote the implementation of the proposed heat utilization system) was developed. In addition, the long-term cost-effectiveness simulation was carried out considering the renewal of facilities.

In sub-theme 3, the proximity between incinerators and industries was investigated to check the potential of steam transportation all over the country. Targeting Aichi prefecture, we estimated spatial distribution of steam demand of industries at 1km mesh resolution. By comparing the spatial steam demand and the locations of incinerators, we estimated the business potential of steam supply projects in the prefecture.

Based on the above scientific achievements in this study, we had many meetings with stakeholders, to promote the implementation of efficient heat utilization systems. In some sites, detailed feasibility studies are ongoing for real implementation. In addition, our research results have been utilized at multiple committees of the Ministry of the Environment and was included in the guidance and so on. Also, we had opportunities to explain our research results to stakeholders and citizens at lectures which were organized by the Ministry of the Environment. Thus, our study contributed to the environmental policies by showing the efficient ways to utilize waste as energy source and reduce CO₂

emission. We will continue the effort to disseminate the proposed efficient heat utilization systems.